



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV MAZACÍCH KAPALIN NA PRŮVODNÍ VELIČINY
TVÁŘENÍ ZÁVITŮ**

ON THE EFFECT OF LUBRICATING FLUIDS ON SPECIFIC PHENOMENA OF THREAD FORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zuzana Vnuková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Zuzana Vnuková**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv mazacích kapalin na průvodní veličiny tváření závitů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor současných procesních kapalin pro technologie tváření závitů na trhu – druhy, vlastnosti, výhody a nevýhody, s bližším zaměřením na polymerních kapaliny a nanoaditiva. Stručná charakteristika technologie tváření závitů pomocí závitníků, možnosti kvantifikace těchto účinků procesních kapalin a maziv na kvalitu produkce, zatížení a trvanlivost nástrojů.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše tematiky.
Analýza tvářecího procesu pro zvolený závitový nástroj.
Experimentální zkoušky, jejich statistické vyhodnocení.
Výsledky.
Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOPECKÝ, L. Aditiva s nanočásticemi a vlastnosti procesních kapalin. MM Průmyslové spektrum. Praha. 2020. č. 10. s. 71-72 . ISSN 1212-2572.

GRZESIK, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Elsevier B. V. 2008. pp. 472. ISBN 978-0-08-044534-2.

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

ZHU, Y. Q. et al. Shock-Absorbing and Failure Mechanisms of WS2 and MoS2 Nanoparticles with Fullerene-like Structures under Shock Wave Pressure. J. AM. CHEM. SOC. 2005, 127, p. 16263-16272. ISSN: 1520-5126.

SCHUFFERHAUER, C., WILDERMUTH, G., FELSCHE, J., TENNE, R. Phys. Chem. Chem. Phys. 2004, 6, p. 3991. ISSN1463-9076,

SINGH, R. K. SinghEmerging application of nanoparticleenriched cutting fluid in metal removal processes: a review.J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. ISSN 1678-5878.

AMRITA, M., SHARIQ, S. A., MANOJ, G. CH. Experimental investigation on application of emulsifier oil based nano cutting fluids in metal cutting process. 12th Global Cong Manuf Manage Proc Eng. 2014.Vol. 97, pp.115–124.

LAZIČ, D. et.al. Effect of if-ws2 nanoparticles addition on physicalmechanical and rheological properties and on chemical resistance of polyurethane paint.

OTEH 2016 Conference, Belgrad, 6.-7.10, 2016, pp. 606-613.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

.....
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavní náplní této práce bylo porovnat používané procesní kapaliny ve strojírenství se zaměřením se na polymerní a aditivní kapaliny. Vybrané polymerní a nanoaditivní kapaliny byly porovnány na základě zkoušky tváření závitů, během které byly testovány různé koncentrace jednotlivých kapalin. Všechna data z experimentů byla hodnocena a posuzována z hlediska jejich vlastností a doporučena pro další praxi.

Klíčová slova

tváření závitů, procesní kapaliny, nanoaditiva, polymerní kapaliny, tvářecí závitníky

ABSTRACT

The main task of this work was to compare the being used process fluids in mechanical engineering with a focus on polymer and additive fluids. Selected polymer and nanoadditive fluids were compared based on a thread forming test, during which different concentrations of individual fluids were tested. All data from experiments were evaluated, assessed in terms of their properties, and recommended for further practice.

Key words

thread forming, process fluids, nanoadditives, polymer liquids, forming threads

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VNUKOVÁ, Zuzana. *Vliv mazacích kapalin na průvodní veličiny tváření závitů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132843>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv mazacích kvapalin na průvodní veličiny tváření závitů** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20.5.2021

Datum

Bc. Zuzana Vnuková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat pánu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky, náměty a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále chci poděkovat pánu Jiřímu Čechovi za odbornou pomoc při řešení experimentální části této práce. V neposlední řadě bych ráda poděkovala pánu, Ing. Martinovi Zmrzlému, Ph.D., Ing. Anně Olině a Ing. Evě Sedlákové za jejich pomoc a cenné rady a odbornou konzultaci při zhotovování snímků na elektronovém mikroskopu. Zvláštní poděkování patří panu RNDr. Aleši Muroňovi, Ph.D. za časté konzultace a poradenskou činnost.

OBSAH

ABSTRAKT	5
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD	10
1 PROCESNÍ KAPALINY	11
1.1 Základní rozdělení procesních kapalin	11
1.1.1 Vodou mísitelné procesní kapaliny.....	11
1.1.2 Ve vodě rozpustné procesní kapaliny	13
1.1.3 Příklady tvářecích médií	13
1.2 Nano-aditiva.....	15
1.2.1 Charakteristika grafenu a jeho aditiv	15
1.2.2 Vlastnosti grafenu a jeho aditiv v oblasti tribologie	16
1.2.3 Grafenové deriváty	17
1.2.4 Grafen v kombinaci s anorganickými modifikátory	17
1.2.5 Grafen v kombinaci s organickými modifikátory	19
1.2.6 Grafen v kombinaci s polymerními modifikátory	19
1.3 Polymerní kapaliny	20
1.3.1 Charakteristika polymerů.....	20
1.3.2 Vlastnosti polymerů v oblasti tribologie.....	21
1.3.3 Polymerní kartáče	21
2 ZKOUŠKY PROCESNÍCH KAPALIN	23
2.1 Pin on disk	23
2.2 Tváření závitů	24
2.2.1 Charakteristika technologie tváření závitu	24
2.2.2 Testy tváření závitů v laboratořích	27
2.2.3 Testy tváření závitů na CNC strojích.....	28
2.2.4 Simulace tváření závitu.....	28
2.2.5 Opatření závitu a závitníku	28
2.3 Nekonenční testy.....	28
3 ZVOLENÁ METODIKA PRÁCE	30
3.1 Použitý nástroj a materiál	30
3.2 Testované kapaliny	31
3.3 Měřicí sestava	33

3.4	Proces tváření závitů	34
3.5	Vyhodnocování tvářecích procesů	36
3.6	Hodnocení poškození závitníků	37
3.7	Snímkování poškozených závitů	39
4	HODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ	41
4.1	Testování kapaliny N1	41
4.1.1	Grafy momentových průběhů	41
4.1.2	Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu.....	43
4.1.3	Poškození tvářecího závitníku	44
4.1.4	Snímky povrchových struktur závitů	46
4.2	Testování kapaliny N2	47
4.2.1	Grafy momentových průběhů	47
4.2.2	Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu.....	48
4.2.3	Poškození tvářecích závitníků	49
4.2.4	Snímky povrchových struktur závitů	55
4.3	Testování kapaliny P.....	56
4.3.1	Grafy momentových průběhů	56
4.3.2	Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu.....	58
4.3.3	Poškození tvářecích závitníků	59
4.3.4	Snímky povrchových struktur závitů	60
5	DISKUSE.....	62
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

ÚVOD

V dnešní době, když jsou stále přísnější ustanovení legislativy od Evropské unie na nakládání s nebezpečným odpadem, zahrnující i procesní kapaliny, se jednotlivé podniky snaží o zastoupení úloh klasických mazacích kapalin jejich ekologičtějšími, ekonomičtějšími, a hlavně čistšími variantami.

Často uváděnou rizikovou skupinou v otázkách enviromentálních dopadů na tvorbu skleníkových plynů jsou běžné procesní kapaliny. Reakcí na to jsou změny ve složeních technických kapalin na bázi chlorovaných sloučenin, fenolů, dusitanů a aminů, které mohou vést ke vzniku karcinogenních druhů tzv. N-nitrosaminů. Proto jsou postupně nahrazovány nově vyvíjenými mikroemulzemi, polymerními a nanoaditivními kapalinami. Tyto procesní kapaliny jsou rozmanité svými vlastnostmi, zejména kvůli různorodému chemickému složení. Originální receptury příprav si většinou nechávají firmy v utajení a uvádějí jenom jejich nebezpečné složky, vlastnosti a účinky. V mnoha případech jsou získávány na základě tribologických testů (např. tzv. metodou „*pin on disk*“) provedených v laboratorních podmínkách. Popsané charakteristiky jsou vhodné zejména pro jednoduchou orientaci v závislosti na svém využití. Ne vždy ovšem zahrnují všechny potřebné informace pro danou strojírenskou technologii. Proto je nezbytné provést i jiné testy, které co možná nejpodrobněji zmapují vlastnosti určených kapalin při skutečných technologických podmínkách, blízcích se jejich nepřetržitému využívání.

Předkládaná diplomová práce vznikla na základě spolupráce s firmou, působící v oblasti automobilového průmyslu. Pro zkoumání byly vybrány jedna polymerní a dvě nanoaditivní kapaliny. Snahou bylo najít způsob testování, kterým by se tyto kapaliny daly přibližně otestovat v nasimulovaných podmínkách, za jakých bude daná kapalina běžně užívána v každodenním provozu. Na konci by mělo dojít k výběru jedné kapaliny, která bude využívána v praxi v určité koncentraci a dlouhodobě.

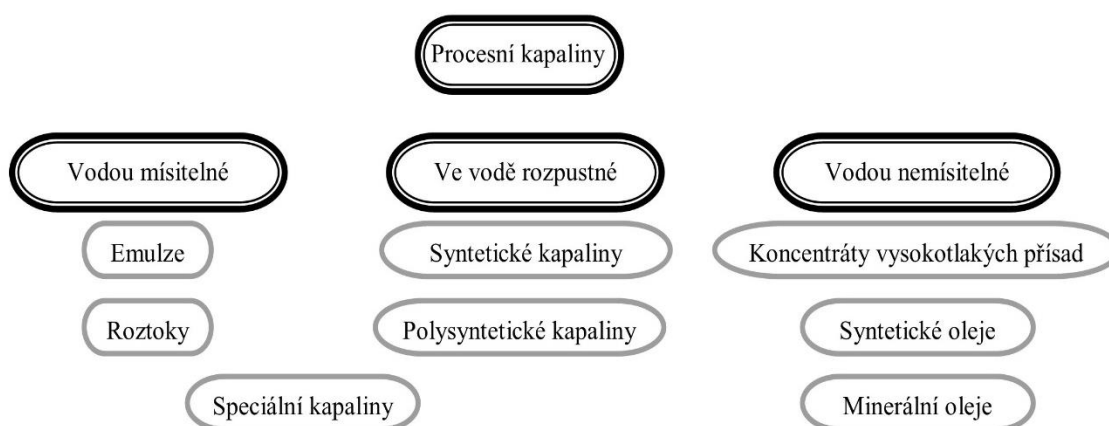
Po bližším prozkoumání celého problému byla vybrána technologie tváření závitů jako nejvhodnější na provedení potřebných zkoušek. Detaily této operace, použité závitníky, podmínky procesu i kvalita vody, to všechno jsou parametry, které významně ovlivňují celkový výběr. Zkoušky byly postupně provedeny pro jednotlivé kapaliny a jejich koncentrace na základě informací, doporučení od výrobce a podmínkách provozu. Všechny experimenty byly naměřeny za stejných podmínek a jsou v druhé polovině této práce podrobně rozebrány, zdokumentovány a popsány. Samotné posuzování bylo provedeno postupně na bázi momentových účinků, působících sil a způsobených poškození povrchů závitů i závitníků. Ze zjištěných dat byly vyvozeny závěry a doporučení pro další použití v praxi.

1 PROCESNÍ KAPALINY

V současnosti je na trhu velké množství různých procesních kapalin, které se používají na chlazení nástrojů i obrobků v průběhu řezání, obrábění či tváření. Jejich hlavním účelem je minimalizovat tření a chránit samotný povrch obrobků v průběhu celého procesu a tím prodloužit jejich životnost. Důraz je v poslední době kladen na účinek procesních kapalin na životní prostředí, schopnost recyklace i dodržování stále přísnějších hygienických a bezpečnostních předpisů [1; 2]. Proto dochází k prudkému rozvoji zejména polymerních kapalin, nebo také kapalin na bázi nano-aditiv či minerálních olejů. Těmto modernějším, ekologicky a ekonomicky přijatelnějším druhům ovšem předchází celá řada jiných, rovněž v průmyslu hojně využívaných chladicích médií.

1.1 Základní rozdělení procesních kapalin

Pro zjednodušenou orientaci se dříve procesní kapaliny rozdělovaly na chladicí a mazací, podle převažujícího účinku při aplikaci. Tohle dělení je už zastaralé a v dnešní době kdy, legislativní nařízení se odráží ve složení, technických a aplikačních vlastnostech procesních kapalin téměř zavádějící. Už jen zřídka se lze setkat s procesní kapalinou, která by byla speciálně určena pouze pro jeden z jejích účinků. Mnohem častěji se vyskytují tzv. komplexní procesní kapaliny, které sdružují do jednoho názvu všechny potřebné účinky [3]. Za praktičtější se dá považovat dělení na základě toho, zda danou komplexní procesní kapalinu lze nebo nelze ředit vodou, jak znázorňuje obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení procesních kapalin podle rozpustnosti ve vodě – podle [4].

Po potřeby této diplomové práce budou dále rozebírané jenom první dvě skupiny procesních kapalin, protože už od začátku se uvažovalo nad možností i nutností ředění vodou.

1.1.1 Vodou mísitelné procesní kapaliny

Dnešní doba prochází obrovským trendem spočívajícím ve změně receptur pro zabezpečení maximální výkonnosti při minimálním vlivu na životní prostředí i obsluhu strojů. Nově vznikají kapaliny s hodnotami pH v rozpětí 7,0-5,5, čímž snižují relativní koncentraci aktivní zásady pod 5 % [1]. Dosahuje se tím menšího účinku na poškození a sušení pokožky rukou obsluhy strojů.

Tyto procesní kapaliny se vyznačují vyšší účinností při chlazení i mazání, dobrou odolností proti korozi, multifunkčním nasazením v průmyslu (od běžných litin až po hliníkové slitiny), ve kterém jsou vysoké požadavky na ochranu nástrojů.

Mezi jejich nevýhody rozhodně patří vyšší náchylnost ke korozi, nízká stabilita vlastností v čase i nízká účinnost při specifických režných procesech. Je zapotřebí věnovat pozornost obsahu solí v kapalinách. Nadměrné množství solí vede ke nevratným negativním změnám (zejména mají účinek na stabilitu disperzního prostředí) v kapalinách.

K dalšímu poměrně důležitému aspektu, na který netřeba zapomínat jsou mikroorganismy. Jejich přemnožení v procesních kapalinách může vést k poklesu pH a postupnému rozkladu kapaliny. Na odstranění mikroorganismů z kapalin se používají různé biocidní prostředky [5].

Vodní emulze

Jako emulze se obecně považuje termodynamicky nestabilní dvoufázový systém tvořený dvěma a více hydrofobními nebo hydrofilními látkami omezeně mísitelných až nemísitelných kapalin (nejčastěji jde o disperzní soustavu jemných kapek oleje ve vodě). Stabilitu této směsi zajišťují emulgátory, koemulgátory a mnohé další složky, k nimž patří např. inhibitory koroze, biocidy, fungicidy a mnohé další. Některé mohou obsahovat kolem 20 i více různých surovin (komponent) [6].

V dnešní době jsou poměrně rozšířené hlavně v obrábění, kde tvoří téměř 75 % používaných procesních kapalin [7]. Podle typu struktury olejového koncentrátu je lze dále rozdělit na makroemulze a mikroemulze.

Makroemulze jsou hrubší disperzní emulze s koncentrací kolem 80 % minerálního oleje naředěného vodou, známé také jako koloidní roztok [8]. Vytváří zpravidla bílé zbarvené emulze jako mléko. Makroemulze může být klasifikována i na základě kapiček sedimentu, nebo plovoucí disperzní fázi. Makroemulze je nestabilní s absorpcí pevných látek na povrchu.

Mikroemulze představují jemnou transparentní disperzní velmi stabilní, vysoce homogenní emulzi s obsahem vody v rozmezí 20–40 %. Zbytek je tvořen minerálním olejem s vysokým podílem přísad, což je činí ekologicky šetrnějšími k životnímu prostředí. Někdy jsou téměř průzračné. Jejich součástí mohou být i různá aditiva mezi která se řadí tzv. EP aditiva (**EP** – *Extreme Pressure*, aditiva odolná vysokým tlakům) [9]. Tyto přísady napomáhají k získání příznivých hygienických vlastností jako i mimořádných výkonů se životností v řádu několika měsíců a ochrany vůči korozi.

Vodné roztoky

Základ vodních roztoků tvoří voda, která vyžaduje množství úprav předtím, než je použita. Těmito úpravami jsou myšleny např. změkčování, přidávání přísad proti korozi, proti pěnivosti a pro zlepšení smáčivosti.

Jejich největší výhoda spočívá ve velmi dobrém odvodu tepla, proto se vyznačují působivým chladicím účinkem, ale naopak téměř žádným mazacím účinkem. Dochází u nich k časté tvorbě kalů doprovázené nepříjemným zápachem. Tohle způsobují přemnožené anaerobní bakterie [10]. Je potřebné dohlížet na to, aby byly roztoky vždy alkalické. I přes veškeré nevýhody patří vodným roztokům prvenství v jednoduchosti i pořizovací ceně.

1.1.2 Ve vodě rozpustné procesní kapaliny

V této kategorii převažují syntetické kapaliny, pro které jsou typické homogenní čiré roztoky s rozpuštěnými, emulgujícími glykoly (dvojsytné alkoholy), nebo estery na molekulárních úrovních, téměř bez minerálních olejů.

Mají vyšší stálost proti působení bakterií i menší negativní účinek na životní prostředí než emulgační kapaliny. Ve výrobě se vyznačují velkým přínosem pro pracovní hygienu a ekologii. Jsou nehořlavé a nedýmící v průběhu výrobních procesů. Cenově jsou na dnešním trhu mnohem dostupnější než kdysi, dokonce i ve srovnání s oleji [11].

Syntetické kapaliny

Pro tyto kapaliny je typické složení zcela bez minerálních olejů. Namísto nich jsou hojně užívané různé druhy aditiv na bázi aniontů rozpustných ve vodě (upřednostňuje se užití tzv. měkké vody, bez vápenných složek). V nepříliš častých případech jsou nalezeny i produkty na bázi kationtů s příznivými efekty na lidskou pokožku [12]. Ty se používají jenom výjimečně z důvodu jejich nekompatibility s dalšími běžně používanými surovinami.

Jejich zajímavou vlastností je schopnost zamezit pronikání cizích strojních, tzv. úkapových, olejů do této kapaliny a tu de-emulgovat. Vyznačují se dobrými chladicími, mazacími i ochrannými účinky (i nízké koncentrace značně zabraňují vzniku koroze).

Mezi nevýhody se řadí nutnost četnějších kontrol stupňů koncentrace, z důvodu lehkého rozptýlu a následného odparu vody z kapaliny, a tím změny její koncentrace [13]. Taktéž mají silné alkalické a čistící vlastnosti.

Obvykle jsou používány v moderních technologických parcích pro jejich rychlou přípravu složení, bez použití chlórů, dusitanů i fenolů.

Polysyntetické kapaliny

U těchto kapalin, na rozdíl od syntetických kapalin, se může vyskytovat stopové množství minerálních olejů (maximálně 30 %). Proto jsou pojmenovány polysyntetickými kapalinami. Obvykle k tomu dochází rozptýlením oleje v syntetické kapalině v průběhu procesů obrábění, tváření, řezání. Tyto částice, které jsou mnohem menší než u emulzních kapalin, přinášejí kapalině příznivější mazací schopnosti, než má čistá syntetická kapalina [14].

Speciální kapaliny

Jde o specifickou skupinu procesních kapalin určenou pouze pro danou operaci, nedají se použít v jiných případech. Obvykle se do této kategorie řadí jednoúčelové procesní kapaliny pro neobvyklé typy procesů [15].

Příkladem také to technologii může být tzv. *Flowdrill*, kdy dochází k použití uhlové rychlosti a axiální síly pro lokální tváření materiálu za pomoci třecí síly. V místě tváření dochází nejen k minimálnímu odebrání třísky tvářecím vrtákem, ale i k natavení obráběného materiálu [16].

1.1.3 Příklady tvářecích médií

V této podkapitole se nachází příklady různých vodou mísitelných tvářecích médií, které jsou běžně dostupné a používané v každodenním provozu. Dále jsou uvedeny i jejich základní charakteristiky.

Pro lepší orientaci a přehlednost, popřípadě jejich porovnání, jsou všechny zpracovány do jedné přehledné tabulky (Tab. 1).

Tab. 1 Přehled tvářecích kapalin [17; 18; 19; 20; 21; 22]:

Název	Charakteristika	Použití	Aplikace	Vlastnosti	Ředění
EUCUT 00EP	Ve vodě stabilní mléčně bílá emulze.	Tváření, lisování, tažné operace	Nejnáročnější tváření kovů.	Velmi tenké, polární vrstvy, vynikající ochrana proti korozi.	Refraktometr. index 0,92, 50% koncentrace minerálního oleje.
LUBRODAL ST 500 V	Vodou mísitelné vysokoteplotní mazivo bez obsahu grafitu s výbornou separační účinností	Kování, zpracování kovů, oběhové mazání.	Válcování za tepla při výrobě bezešvých trubek.	Antikorozní účinky, necitlivý vůči mrazu, nekouří, nehoří, lepší provozní hygiena.	S vodou ředitelný v poměrech 1:1 nebo 1:3. Neředitelný aplikovat nástřikem, máčením.
LUBRODAL FC 331	Vodou mísitelné mazivo s obsahem grafitu	Kování, zpracování kovů	Kovací a separační postupy při horkém a polotuhém kování	Výborná smáčivost při vysokých teplotách, stabilní proti oxidaci.	Před použitím nutno zředit s vodou v poměru 1:1, nebo 1:3.
LUBRODAL F 70 M-40 LV	Separační prostředek pro výrobu trubek, s obsahem grafitu	Kování Zpracování kovů	Výroba trubek, povlaky trnových tyčí, kuliček.	Dobře smáčivý i za vysokých teplot, teplotní stabilita.	Ředit v jakémkoliv poměru nepoužívat koncentrát.
LUBRODAL KB 10 conc	Bílé, vodou mísitelné, vysokoteplotní mazivo	Zpracování kovů, pro teploty nad 200°C.	Na teplé články řetězů postřikem, ponorem.	Bez emisí, dlouhé intervaly mazání a údržby.	Ředit s vodou v poměru 1:2 až 1:10.
Evaporative Fluid 2002	Aditivovaná, lehce odpařitelná a mazací kapalina	Lehké a střední lisování, tváření, profilování	Řezání tyčí a hliníkových profilů, hluboké tažení.	Odpařitelná kapalina, optimalizace rychlostí, nízký zápach.	Lze za určitých podmínek ředit s vodou.

1.2 Nano-aditiva

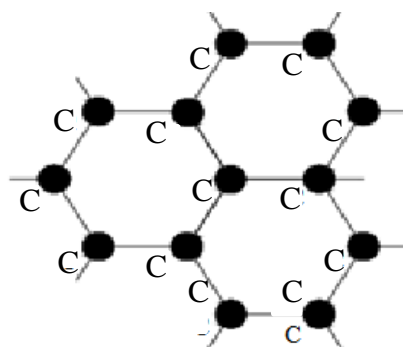
Jak již bylo výše zmíněno, přidání aditiv do procesních kapalin má příznivé působení na jejich chladicí i mazací vlastnosti (výsledný produkt je v odborné literatuře označován jako nanoaditivum, nebo *nanofluid*). Reakcí aditiv s materiálem při vysokých teplotách v průběhu výroby se zamezuje adheznímu opotřebení či tvorbě nárůstků. Jejich výkonnost výrazně ovlivňuje chemické složení, proto se vždy přizpůsobuje specifickým potřebám daného procesu. Kvůli poptávce po stále výkonnějších procesních kapalinách vznikaly komplexní kapaliny s různými aditivními přísadami v počtech přes 300 pro jednu takovou kapalinu [23]. Toto zastavila až řada předpisů a legislativních norem, které omezují používání určité části chemických látek z důvodu nepříznivého účinku na životní prostředí a ochrany zdraví obsluhujícího personálu. Dále se zohledňují i ekonomické aspekty výroby jakými jsou náklady na pořízení jednotlivých složek (např. přísady, základní tekutiny), jejich dostupnost na trhu, atd.

Vzhledem k výše zmíněným požadavkům jsou za posledních přibližně 29 let poměrně diskutovanými a testovanými aditiva na bázi nanočástic, z nichž vynikají zejména grafenové částice. Právě jim je věnovaná zvýšená pozornost v této kapitole.

1.2.1 Charakteristika grafenu a jeho aditiv

Grafen je alotropní formou uhlíku zahrnující jednoatomovou vrstvu atomů uhlíku uspořádaného ve dvourozměrné rovině. Každá z vrstev je jiná z důvodu elektrických a mechanických vlastností, je tvořena atomy uhlíku uspořádanými do pravidelné šestiúhelníkové struktury (obr. 2) vázanými vazbami sp^2 . Vzdálenost dvou atomů uhlíku je 0,142 nm [24]. Vysoká energetická hodnota této vazby má za následek pevnost všech vazeb mezi dvěma uhlíky v rovině.

V prostoru jsou rovinné grafenové vrstvy spojené slabou van der Waalsovou vazbou a tvoří trojrozměrnou mříž známou jako grafit. Vysoký Youngův modul má za následek snížení tření a zlepšení mazacích vlastností [25]. Kovalentní i nekovalentní vazby na povrchu grafenových nanočástic sice netvoří dokonalou rovinu, plochá struktura však i tak snadno vstupuje do třecích oblastí v místech kontaktu.

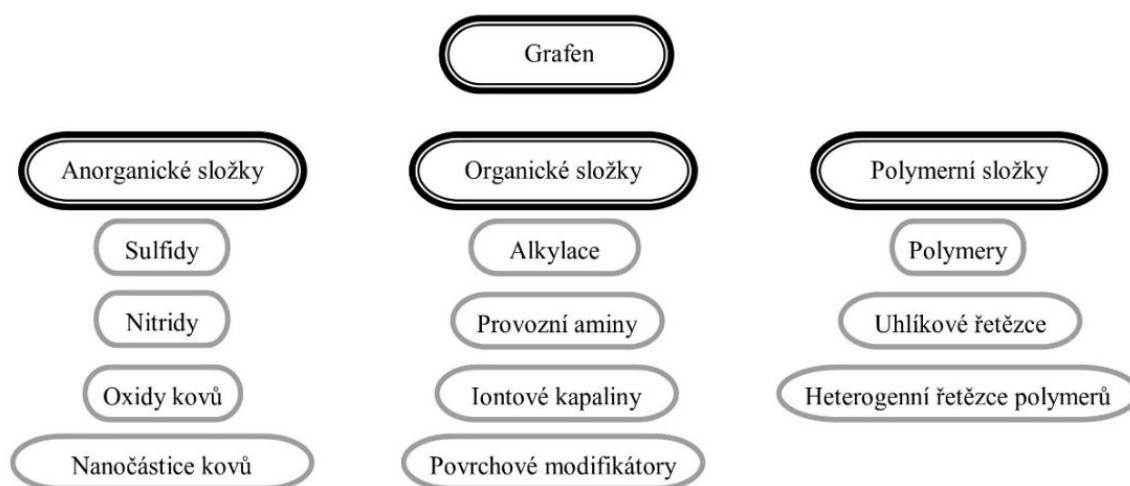


Obr. 2 Grafenová hexagonální mřížka – podle [26].

Na počátku se v kontaktní oblasti kapalného maziva a obrobku tvoří třecí a posuvné síly. Ty jsou působením vysoké povrchové energie v místě tření snadno absorbovány mazivem a vytváří tak ochrannou vrstvu o velikosti několik nanometrů, která zabraňuje přímému kontaktu mezi dvěma klznými plochami a sníží tření i opotřebení [26].

Pokud je působící síla příliš velká, nebo působí nepříjemně dlouho, dojde k prasknutí vzniklé nano vrstvy, čímž dojde k vzniku velkého množství tepla a stimulů pro změny povahy vazeb. Přítomnost tohoto typu reakcí má blahodárný účinek na schopnost mazání grafenových nanoaditiv. Ve výzkumu Mura a kol. [27] bylo dosaženo předpokladu, že morfologie grafenových desek má bezprostřední účinek na jejich vlastnosti mazání (čím pravidelnější morfologie, tím lepší mazací výkon).

Grafenová nanoaditiva se dostala do popředí pozornosti nejen na základě jejich vynikajících samomazacích vlastností, ale i kvůli jejich dobrému využití v oblasti superplasticity a ultra-nízkého tření. Obecně je lze dělit podle různých funkčních modifikátorů do tří skupin (obr. 3) na základě obsahu dalších složek v sloučenině. Po rozsáhlém výzkumu bylo dokázáno, že všechny si zachovávají strukturu grafenové matrice.



Obr.3 Tři druhy funkčních modifikátorů grafenu – podle [28].

1.2.2 Vlastnosti grafenu a jeho aditiv v oblasti tribologie

Mechanické vlastnosti materiálů na bázi grafenu mají značný potenciál a jedinečnou funkci ke zlepšení aplikací souvisejících s mazacím výkonem. V článku (podle Mura a kol. [29]) jsou uvedeny experimentální zkoušky, kdy byla testována maziva s i bez grafenových nanoaditiv, a to shodným způsobem za stejných podmínek. Výsledky ukázaly, že grafen přidáný do maziva nabude obecně nižších hodnot koeficientu tření než mazací kapalina bez něho. Rozdíl, o který bude hodnota koeficientu tření snížena, závisí zejména na průměru plechu, vzdálenosti mezivrstev, stupni defektů tríssek, tvrdosti, počtu vytvořených grafenových vrstev atd. Nejen z tohoto výzkumu je zřejmé že, grafen je slibným kandidátem na ultratenké mazivo pro řešení adheze, tření v mikro – a nano – mechanických systémech [30].

Pokud je grafen používán v kombinaci s vodou, nebo olejem, může docházet k jeho shlukování se a precipitaci. K jeho největšímu nedostatku rozhodně patří nemožnost rovnoměrného nanesení grafenové vrstvy po celém povrchu mazaného nástroje. Dochází zde k odlišným orientacím jednotlivých grafenových částic v mazivu. Hojně jsou proto užívány polymerní matrice, které by měly alespoň částečně zamezit tomuto jevu. V případech, kdy dojde k poškození grafenových vrstev, dochází k vzájemnému překryvu fragmentů, několikanásobnému zhoršení tření, přičemž však i mikrometrické zbytky grafenu i nadále snižují tření (opět záleží na tloušťce nanesené vrstvy grafenu) [31].

V článku [32] byla zkoumána tribologická účinnost nanodiamantů (tzv. *nanodiamonds*) ve vodných suspenzích. Z výsledků experimentů je zřejmé, že přirozeně špatnou mazací schopnost vody lze zlepšit použitím nanodiamantů. V průběhu experimentu docházelo k redukci tření maximálně o 70 % a opotřebení nejvýše o 88 %. Toto zlepšení je připisováno zejména kuličkovým účinkům nanodiamantů, přesněji jde o změkčenou grafitizovanou skořápku nanodiamantů. Samotná výška redukce je závislá na procesu přípravy suspenzí nanodiamantů. V extrémních případech docházelo ke strukturním změnám v nanodiamantech, které se měnily z krystalických 3D diamantů na 2D vrstevné grafitizované struktury (z sp^3 na sp^2). Celková analýza experimentů prokázala, že existuje optimální hodnota hmotnostní koncentrace, při které vykazují nanodiamantové nanolubrikanty optimální výkon.

V automobilovém průmyslu se grafenová aditiva přidávají do převodových olejů, přispívají ke snížení opotřebení součástí (v průměru o 50 %), prodlouží tím jejich životnost jednotlivých zařízení [33]. Dále jsou hojně užívány v oblasti nejnáročnějších průmyslů, a to zejména pro mazání ložisek, kdy lze dosáhnout až trojnásobného prodloužení doby pro jejich nutný servis.

1.2.3 Grafenové deriváty

V rozsáhlých výzkumech [34] bylo zjištěno, že ještě lepších výsledků než samotný grafen dosahují jeho jiné formy – deriváty. Nejenom, že fungují lépe, ale také řeší jeho problémovou náchylnost k shlukování se. Grafenové rovinné šestičlenné uhlíkové struktury jim umožňují mít velké množství derivátů, z nichž poměrně zkoumanými jsou zejména grafen oxidy a legované grafeny (legujícími prvky jsou hlavně dusík, fosfor, fluor), grafitické filmy a vlákna. Tato technika úpravy grafenu přináší s sebou poměrně jednoduchou disperzi v základním mediu, protože ji lze aplikovat ve speciálním prostředí. Navíc grafenové deriváty mají příznivý účinek na chemické, fyzikální i mechanické vlastnosti samotného grafenu [34].

Grafen oxidy (GO)

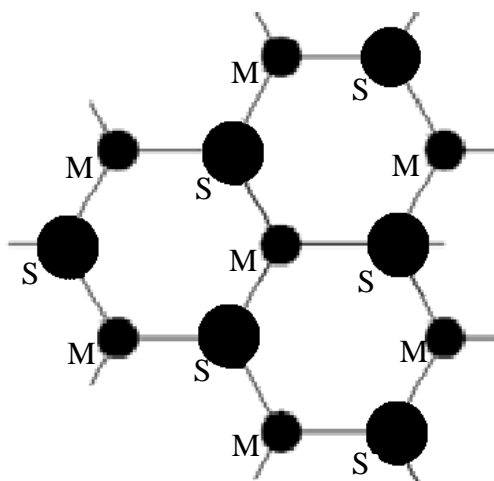
Pro zlepšení vlastností mazání grafenu je v současnosti hojně užíváno kyslíku, z tohoto důvodu byl zvolen jako příklad pro danou skupinu. K samotné průmyslové výrobě je užíváno spíše grafitu, z tohoto důvodu má GO tak velké nákladové a výrobní výhody. Rovnoměrným rozptýlením kyslíku v derivátu dochází k vytvoření speciálních chemických molekulárních skupin, díky nimž vzniká důležité aditivum široce využívané v oblasti tribologie [35].

1.2.4 Grafen v kombinaci s anorganickými modifikátory

Grafen má obecně nízkou rozpustnost ve většině rozpouštědel včetně vody, proto jsou do něj mnohem častěji zaváděny různé modifikátory. Zavedení různých diferenčních materiálů do uhlíkových řetězců se provádí za pomoci modifikátorů (viz obr. 3), a tím dochází ke zvýšení rozpustnosti u grafenů i GO. S pomocí anorganických modifikátorů (např. sulfidů, nitridů, oxidů kovů, kovových nanočástic atd.) jsou z grafenů a GO vytvářeny různé multifunkční nanokompozity. Ty vymezují celou škálu výhod použití grafenu jako přísady do maziv. Maziva jsou totiž jedny z mála látek, ve kterých vykazuje grafen alespoň nějakou rozpustnost.

Obecně třída sulfidů, s obecným vzorcem MS_2 , má typickou třívrstvou strukturu reprezentující celou řadu sulfidů přechodných kovů široce využívanou v tribologii pro jejich

speciální strukturu, vynikající fyzikální a chemické vlastnosti. Horní a dolní vrstvy zmíněné třívrstvé struktury jsou tvořeny hexagonálním těsným uspořádáním atomů síry a vloženy kovové M vrstvy (obr. 4). Atomy síry jsou v krystalické struktuře propojeny s kovem slabou van der Waalsovou vazbou. V sulfidech (podobně jako v grafitu) se zde nacházejí vazebně silné kovalentní vazby S-M-S a slabou spojovací mezi vrstevnou vazbou, kterou je snadné (působením vnějšího tlaku) porušit [36].



Obr. 4 Obecná schéma třídy sulfidů – podle [36].

Níže jsou charakterizovány dva představitelé (MoS_2 a WS_2) se zaměřením jejich výběru na oblast mazání a provádění mazacích zkoušek v průmyslu.

Sulfid molybdeničitý (MoS_2)

V mnoha obráběcích i tvářecích operacích se prokázaly nanotrubičky MoS_2 svými vynikajícími vlastnostmi s nízkým třením, proti opotřebení za extrémních tlaků a teplot. Pokud je ve směsi obsah kompozitního materiálu kolem 3 hm.% dosahuje tzv. tribologický koeficient nejnižší hodnoty [37]. Významnější lubrikační účinky dosahuje MoS_2 za vysokých teplot ($600\text{ }^\circ\text{C}$). Obdobné vlastnosti v procesu mazání vykazuje třeba i pyrit (FeS_2).

V článku od Maritsa [38] je pozorováno nanoskopické chování disperzních nanotrubiček MoS_2 v uhlovodících za pomoci molekulárních dynamických simulací. Byla analyzována zejména adsorpce uhlovodíků na vnější straně nanotrubic i chování uzavřené fáze uhlovodíků uvnitř (na vnitřních stranách) nanotrubiček. Samotná adsorpce je důležitá pro chování nanokapalin jako mazacích médií, protože vede k velkým strukturálním přeskupením v blízkosti nanotrubiček ve srovnání s objemovou kapalnou fází. Pokud je dosažena stabilita, tak lze tyto nanokapaliny používat pro několik technologických operací, přičemž dochází k lepšímu mazání.

Sulfid wolframičitý (WS_2)

Pro přesné zmapování všech vlastností WS_2 jsou prováděny různé výzkumy. Jeden takový výzkum [39] byl zaměřen na rezistenci nanotrubic WS_2 vůči rázovým vlnám, výsledky byly následně srovnány s rezistencí uhlíkových nanotrubic. Na konci výzkumu se prokázalo, že nanotrubičky WS_2 jsou schopné odolat smykovému namáhání způsobenému rázovými vlnami až ve výši 21 GPa [40]. Dalším zjištěním byla skutečnost, že krystalizovaná

trubicová tělesa vykazují značnou stabilitu v rázu, což vysvětluje jejich výraznou pevnost v tahu. Uhlíkové trubice, které se přeměňují na diamantové fáze, jsou nestabilnější při působení rázových vln než trubice WS_2 . Všechny výše popsány výsledky nasvědčují tomu, že nanočástice WS_2 budou fungovat jako vynikající maziva při mnohem vyšších zatíženích, než se předpokládalo. Toto tvrzení podporuje i fakt, že nanotrubičky WS_2 , které obsahují malé koncentrace defektů, mají podstatně vyšší mechanickou pevnost [40].

Inorganic fullerene nanoadditives (tzv. **IF**, tzn. nanoaditiva ve tvaru uhlíkových kuliček) IF- WS_2 , která se začala vyrábět pro potřeby armády a až o několik let později i pro automobilové, letecké, kosmické průmyslové odvětví (zejména pro obrábění a tváření kovů). IF- WS_2 se vyznačují (stejně jako IF- MoS_2) odolností vůči vysokým teplotám (do 1000 °C) i tlakům (kolem 25 GPa) [41].

1.2.5 Grafen v kombinaci s organickými modifikátory

Mnohé moderní studie [42] uvádějí příznivé vlastnosti kombinací grafenu a organických látek. Doporučují pokračovat ve vývoji nových typů, protože v tom spatřují spíše budoucnost hlavně v oblasti medicíny (zejména v oblasti kloubního mazání). Kombinovat grafen s organickými látkami umožňují jeho typické vlastnosti kovalentních a nekovalentních vazeb [43]. Pro přípravu organických grafenových nanoaditiv se používá modifikátorů na bázi aminů, alkylů a iontových kapalin. Ze zmiňovaných skupin jsou svými vlastnostmi pro průmysl zajímavé iontové kapaliny, z toho důvodu jsou popsány níže.

Iontové kapaliny

Iontové kapaliny (z anglického *Ionic Liquid Functionalized Graphene* dále označované jenom zkratkou **IL**) jsou poměrně používanou skupinou na poli organických grafenových nanoaditiv. Vyznačují se strukturou IL z kationtů a aniontů, proto patří k novým typům ekologických materiálů (v současnosti tzv. zelených materiálů). Studií mazacích charakteristik IL bylo nejen prokázáno zlepšení tření a chování materiálů při opotřebení, ale i existence spolupůsobících (synergických) účinků mezi IL a GO. Synergické účinky mezi IL a GO mají také příznivé působení na snižování tření (přibližně o 40 %) a zvyšování odolnosti proti opotřebení, ale na rozdíl od čistých IL jsou už závislé na tloušťce nanosené vrstvy. Významným zlepšením rozšiřování v oblasti EP (*Extreme Pressure*) maticí přinášejí IL působící v GO. Za podmínek mírného mazání a nízkého zatížení GO – IL dochází k naměření hodnot tření a opotřebení EP v průběhu mazacího procesu pod hodnoty naměřené na počátku mazacího procesu [44]. V případech, kdy je použito vysokých zatížení dochází k významným spolupůsobením IL a GO.

K výhodám IL patří zejména nízká teplota tání (jsou kapalné už při pokojových teplotách), dále se vyznačují poměrně dobrou chemickou stabilitou, elektrickou vodivostí a kluzností. Za nevýhodu lze označit jejich nemísitelnost.

1.2.6 Grafen v kombinaci s polymerními modifikátory

Tato podskupina vzbudila pozornost široké odborné veřejnosti [28] právě kvůli jejich vysokému výkonu při nízkém množství maziva užitého v technologických procesech, značné biokompatibilitě a vysoké tepelné vodivosti. Samotné vlastnosti grafenu v kombinaci s polymerními modifikátory jsou závislé na přilnavosti výsledné směsi maziva k povrchu obrobku, kvalitě grafenového plniva a polymerové matrice. Při používání grafenu v kombinaci s polymerními maticemi dochází k zvýšení výkonu mazání, který je způsobený jejich elektrickými, mechanickými a tepelnými vlastnostmi [28]. Zajímavou

podskupinou jsou nanokompozity na bázi polymerově-uhlíkového řetězce (z anglického názvu *carbon chain polymer-graphene nanocomposites*), které budou dále blíže specifikovány.

Nanokompozity na bázi polymerově-uhlíkového řetězce

Jedná se o polymer, ve kterém tvoří hlavní řetězec atomy uhlíku, proto jsou nazývány polymerově-uhlíkové řetězce. Tuto skupinu tvoří většina olejových (*olefinic*) a dienových (*dienne*) polymerů. (Dienový polymer je označení pro skupinu polymerů na bázi nenasyčených uhlovodíků se dvěma dvojnými vazbami oddělenými pouze jednou jednoduchou vazbou, jako např. u butadienu. V popisovaném případě jsou dieny konjugované. Nebo může jít o nekonjugovaný dien, kdy jsou dvojné vazby odděleny nejméně dvěma samostatnými vazbami a působí nezávisle. Rodina dienových polymerů zahrnuje polymery butadienu, izoprenu, cyklopentadienu a mnohé jiné [45]). V případě polymerově-uhlíkových řetězců jsou polymery přerušené jednou grafenovou nebo GO vazbou.

Zajímavým příkladem dienu je polypropylenový kompozit (dále v práci označován zkratkou **PP**) s grafenem, které byly smíchány při tavení a zkoumány panem Dimitriem a kol. [46]. Hlavní náplní jejich práce bylo posouzení mechanických vlastností materiálů s PP na základě zkoušky tahem. Výsledky pokusů ukázaly, že Youngův modul kompozitu dosahuje vysokých hodnot, čímž je deklarována dobrá přenosová schopnost povrchového napětí mezi PP maticí a grafenem. Z tohoto důvodu byla i tepelná vodivost kompozitu obsahující grafen vyšší.

Jde o jeden z mnoha příkladů, kdy samotné testy poukázaly na to, že obsah grafenu v polymerních maticích má potenciálně kladný účinek na pevnost, tepelnou stabilitu a odolnost proti opotřebení. Ovšem je zapotřebí při formulaci těchto směsí brát v potaz i špatný rozptyl grafenových částic v nepolárních polymerních maticích. Tato vlastnost grafenu omezuje do značné míry jeho aplikaci v polymerech.

1.3 Polymerní kapaliny

Potom, co v roce 2018 vstoupil do platnosti nový zákon, na základě kterého byla určena nová pravidla pro používání nebezpečných látek (formaldehyd, sloučeniny bóru, ...), byli výrobci donuceni se poohlédnout po nových složeních procesních kapalin (zejména s minimálním nebo žádným obsahem minerálního oleje). Jako jedno z možných řešení jejich problému se jevíly nově se rozvíjející technologie chladicích a mazacích kapalin, založených na aditivech, nanoaditivech nebo polymerech. Zejména technologie polymerních kapalin se od té doby těší velké oblibě v technické praxi. Vzhledem ke slibným vlastnostem polymerů v oblasti mazání ložisek do nich byla vkládána obrovská očekávání i na poli procesních kapalin. Už od začátku výzkumů jevíly polymery jisté mazací vlastnosti, na základě kterých se předpokládalo, že časem nahradí stávající technologie na bázi minerálních olejů.

1.3.1 Charakteristika polymerů

Polymery se řadí mezi viskoelastické (kombinace pružných a viskózních vlastností materiálů) materiály. Z materiálového hlediska jsou polymery chápány jako makromolekuly skládající se z jednoho nebo více druhů atomů navzájem propojených kovalentními vazbami. Právě druhy kovalentních vazeb značně ovlivňují mechanickou pevnost a stabilitu polymerů, při působení vyšších teplot a korozního prostředí. Mnohdy se stane, že kovalentní vazby zaniknou v místě působení vyšších teplot a korozního prostředí, a vzniknou zde nové

o dva řády slabší sekundární, van der Waalsovy vazby [47]. Podstatou chemické struktury polymerů je opakující se konstituční jednotka polymerního řetězce (monomer).

Na základě polaritě chemického vzorce opakující se jednotky polymerů je možné říct, jaké budou jeho dielektrické vlastnosti, nebo jak se bude chovat v blízkosti polárních/nepolárních nízkomolekulárních sloučenin [47]. Zároveň lze z hodnoty tohoto parametru určit, jaké budou většinové mezimolekulární soudržné síly působící mezi makromolekulami. V případě nepolárních vazeb se hojně vyskytují převažující slabé disperzní Van der Waalsovy vazby. Další kategorií a jednou z nejsilnějších soudržných sil polárního charakteru jsou vodíkové můstky. Mnohé z fyzikálních a chemických vlastností polymerů jsou vázané na množství opakujících se konstitučních jednotek polymerního řetězce, tedy na molární hmotnost a její polydispersitu [47].

1.3.2 Vlastnosti polymerů v oblasti tribologie

Polymery mají široké využití jak v medicíně a potravinářství, tak i na poli mazání. Nepoužívají se jenom jako modifikátory v grafenových nanoaditivech, ale i jako samostatná obrovská skupina maziv se specifickými vlastnostmi a účinky.

Zvláštní samostatnou skupinou polymerů poměrně složitou na výrobu, jsou tzv. tekuté polymery. Tekuté polymery se dostávají do povědomí díky jejich aplikaci v oblastech zpracování kovů, zejména tváření a obrábění nebo indukčního kalení. Ve všech výše zmíněných oblastech jsou polymery hojně používány, protože jsou téměř bez nebezpečných výparů a taktéž nezamastňují povrchy obrobků a vyznačují se vysokou mikrobiologickou stabilitou [48]. Zajímavou vlastností viskozity polymerů, je její schopnost se zvyšující teplotou několikanásobně zvýšit schopnost mazání a po ochlazení se opětovně vrátit do původní podoby (mohou za to výše zmíněné proměny poměrů kovalentních vazeb a Van der Waalsove vazby).

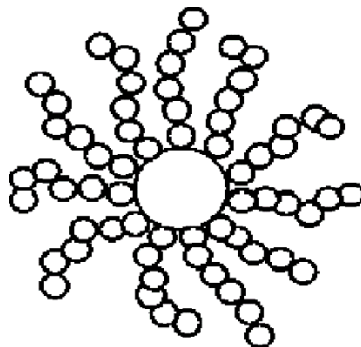
Výsledky z dosavadních experimentů [49] s tekutými polymery prokázaly, že snižují spotřebu koncentráту až o 80 % oproti minerálním olejům, zároveň poukazují na více než trojnásobnou životnost u těžko obrobitelných materiálů.

V případech, kdy dochází k ředění s vodou, je za potřebí dbát na pravidelnou kontrolu hustoty a udržování správné koncentrace dané směsi, z důvodu vypařování vody při procesech chlazení [50]. Nesmí se zapomínat ani na udržování čistoty strojů, protože některé polymery ve vysokých koncentracích způsobují zalepování pracovního prostoru a okolí stroje.

1.3.3 Polymerní kartáče

Tento termín pochází z anglického originálu *Polymer Brush* a rozumí se jím nanopartikulovaný polymerový kartáč, ve kterém jsou řetězy připojeny k jádru v nanoměřítku. Vědecké pokroky v oblasti metod pro výrobu hybridních polymerních architektur v nanoměřítku umožnily syntetizovat nanočástice polymerních kartáčů s kompozicemi navrženými pro řízení struktury a vlastností komplexních tekutin [51]. (Komplexní tekutinou se rozumí tekutina s obsahem snadno identifikovatelné spojitě fáze, která obklopuje dispergovanou fázi, např. koloidní suspenze, emulze, gely, pěny, ...). Jde o poměrně novou metodu, která se inspirovala u živých organismů. Polymerový kartáč (obr. 5) představuje sestavu polymerních řetězců, které jsou jedním koncem přichyceny (při dostatečné velké plošné hustotě) na povrch nanočástice a druhý konec směřuje do kapaliny.

Za předpokladu, že je kapalina pro polymery dobrým rozpouštědlem, se polymerové řetězcy natáhnou.



Obr. 5 Schéma kartáčového polymeru – podle [51].

Klouzavým pohybem dokážou polymerové kartáče výrazně snížit opotřebení a tření mezi povrchy. V posledních desetiletích se mazací výkon polymerních kartáčů za pomoci molekulárních dynamických simulací snažilo jasně rozpoznat a interpretovat velké množství vědců za pomoci molekulárních dynamických simulací. Na základě simulací v článku [52] bylo zjištěno, že efektivní viskozita je nevázaná na zakřivení válcových ploch dvojvrstevných kartáčů a rovná se viskozitě kartáčů mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Samotnou viskozitu totiž určují překrytím mezi kartáči, nezávisle na přesných profilech hustoty kartáčů na vnitřní nebo vnější straně těchto válců. Na základě těchto zjištění je možné mikroskopicky interpretovat třecí mechanismy polymerních kartáčů ve válcových geometriích, a tím lépe navrhnout nová účinná maziva.

Polymer s kartáčovou strukturou, který je rozpustný ve vodě, má příznivé účinky na zlepšení mazacích vlastností vody. V článku [53] byly kombinovány bio-inspirované kartáčové polymery s chitosanovým kopolymerem GO na základě nekovalentních vazeb, a tím byla vyrobena polymerní směs *Chitosan-g-PNIPAM*. Předpokládalo se, že kopolymer *Chitosan-g-PNIPAM* by mohly přispět ke zlepšení mazacích a ořezavých vlastností kapalin na bázi vody. Tento systém je obzvláště šetrný k životnímu prostředí, z toho důvodu se řadí mezi zelené typy nanoaditiv pro mazání na bázi vody. Dále v tomto článku [53] bylo prokázáno značné snížení tření a odolnost vůči opotřebení ve srovnání s klasickým GO a čistou vodou. Synergické účinky kartáčového kopolymeru a dvourozměrných přísad GO mají spolu s disperzní stabilitou modifikovaného GO za následek vynikající mazací vlastnosti nanohybridů.

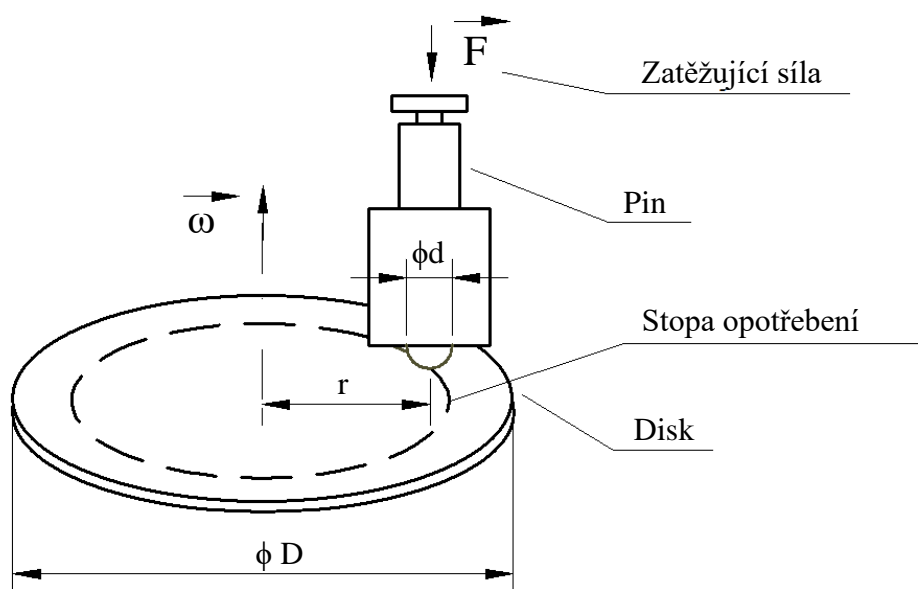
Navzdory slibným vlastnostem polymerních kartáčů je jejich využití na poli mazání omezené. Může za to náchylnost polymerních kartáčů k opotřebení a špatná mechanická stabilita za vysokých normálních a smykových napětí [54].

2 ZKOUŠKY PROCESNÍCH KAPALIN

Na trhu je momentálně neúměrné množství různých procesních kapalin a neustále se vyvíjejí nové, tak aby co nejlépe zohledňovaly legislativní změny a byly šetrné k obsluze strojů. Každá procesní kapalina před svým uvedením na trh musí být vyzkoušená, aby mohli samotný výrobci deklarovat její nezávadnost a vhodnost k použití v určité oblasti průmyslu. K tomu slouží různé druhy zkoušek procesních kapalin tzv. trilogické zkoušky. Samotných tribologických zkoušek je značné množství, každá slouží na přezkoušení určitých typů vlastností dané procesní kapaliny. Některé se řadí mezi běžné, které se pravidelně uplatňují při takřka všech testech zkoušených procesních kapalin jako např. zkouška typu *pin on disk*. Jiné jsou mnohem specifičtější. Provádí se za účelem zjištění chování se procesních kapalin za určitých podmínek, jakým je např. tváření závitů. Nebo jde o zkoušky jednorázového charakteru, které vzniknou jenom pro potřeby daného výzkumu. V této kapitole jsou rozebrány některé z těchto zkoušek. Nakonec je vybrána jedna, která bude dále použita pro praktickou část této diplomové práce.

2.1 Pin on disk

Pin on disk je relativně jednoduchá standardizovaná celosvětově používaná zkouška pro potřeby značení i vývoje materiálů, zkoušení povlaků a mazací schopnosti různých maziv, aditiv a samomazacích systémů. Tato zkouška je určena k přesné a opakovatelné tribologické charakterizaci sypkých materiálů, nátěrů a maziv. Zkouška *pin on disk* se používá zejména pro jednoduché testy opotřebení a tření povlaků s nízkými hodnotami tření, mezi které se řadí uhlíkové povlaky podobné diamantu [55].



Obr. 6 Schématické znázornění pin on disk testu – podle [56].

V průběhu zkoušky *pin on disk* (obr. 6) tlačí stacionární kolík (*pin*) na konstantní rychlosti rotující plochý kruhový disk za typicky neabrazivních podmínek. Předem určenou statickou silou je přitlačen kolík na rotující disk obvykle pomocí ramene nebo páky a připojených závaží, popřípadě za pomoci hydraulického nebo pneumatického systému. Ve

většině testů je kolík umístěn seshora, ale jsou i případy, kdy je kolík umístěn zespodu. Obvykle se umísťuje kolík zespodu z důvodu zabránění styku částic podléhajícím opotřebení a testovanou plochou, nebo pro zjednodušení shromáždění těchto částic pro další analýzu [57]. Po celou dobu zkoušky jsou měřené a zaznamenávané třecí a zatěžovací síly spolu s rychlostí pohybu disku. Naměřené hodnoty slouží k určování tribologických vlastností, zejména koeficientu tření a objemu opotřebení spolu s drsností povrchu mezi dvěma dotykovými plochami.

Kolík může být jakéhokoliv tvaru a materiálu, záleží na simulaci konkrétního kontaktu i použitého materiálu a maziva, popřípadě povrchové úpravy. Ovšem nejčastěji se jako kolík používají sférické tvary (kuličkové, nebo čočkové), nebo válcové, z důvodu snadného ustavení (ploché mohou podléhat určitému vychýlení, které může vést k nerovnoměrnému zatížení, čímž poměrně stíží teoretickou analýzu měření) [58]. Volba materiálu pro kolík je důležitou součástí samotné zkoušky. Materiál nesmí být stejný jako je zkušební plocha, nesmí dojít ke kontaktu tvrdého materiálu kolíku s měkkým materiálem disku nebo naopak. Obě z těchto variant by mohly značně ovlivnit samotné měření vytvářením hlubokých rýh na disku, nebo deformací a mohou vytvářet rychlé opotřebení místa dotyku kolíku s diskem, nebo pouzdra, ve kterém je umístěn kolík.

Pro zajištění kontrolovaného prostředí o stálých provozních podmínkách zkoušky (teplotě, vlhkosti) lze umístit celou sestavu *pin on disk* do klimatické komory, nebo ji vybavit aktivními snímači. Vzhledem k tomu, že výsledky tribologických testů silně závisí na okolních podmínkách prostředí, jsou tribometry typu *pin on disk* vybavené vestavěnými snímači, které v reálném čase měří a zaznamenávají hodnoty teploty a vlhkosti jako funkci času [59]. V neposlední řadě je potřebné tribometry pravidelně kalibrovat, aby měřily přesně a spolehlivě. Všechny tribometry typu *pin on disk* musejí dodržovat mezinárodní normu ASTM G99, ASTM G133 ASTM F732. Na podobném principu fungují i další testy, které se od sebe liší jenom tvarem zkoušeného povrchu, řadí se sem např. *pin on ring*, *pin on flat*, *pin on block tests*. Jediný rozdíl v těchto podobných testech je geometrií kontaktního bodu zkušební tělesa s plochou.

2.2 Tváření závitů

Jednou z opravdu náročných operací, kde je kladen zvláštní důraz na výstavbu pevnostních mazacích filmů s vysokou únosností, patří i vnitřní závitování. V místě tváření závitu dochází ke vývinu tepla, které je způsobeno účinkem tření a plastické deformace materiálu [60]. Má významné působení na výslednou kvalitu obrobeného povrchu a životnost nástroje. Tyto faktory patří k významným důvodům pro odvádění tepla z místa řezu a tím jeho ochlazování.

Tuto funkci plní procesní kapaliny. Jejich účinky se projevují zmenšením tření ve všech oblastech tvorby třísky, lepší kvalitě dosaženého povrchu a klidnějším chodem stroje. Dané kvality a poklesů je dosaženo za předpokladu, že procesní kapalina pronikne do všech oblastí styku závitníku s obrobkem a vytvoří zde účinný mazací film [61].

2.2.1 Charakteristika technologie tváření závitu

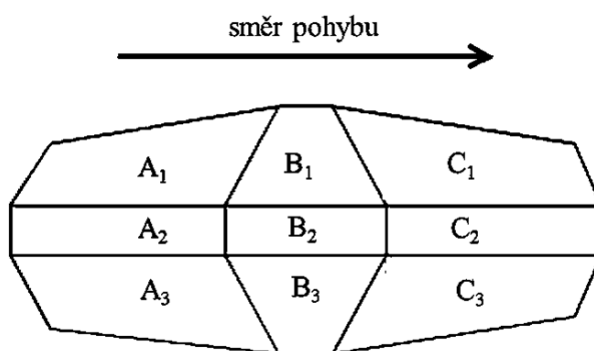
Technologie tváření závitu je charakteristická výrobou pevného závitu v tahu s dobrou odolností kontaktních ploch vůči korozi a únavě bez jakéhokoliv odpadu ve formě třísky. K dalším poměrně významným výhodám patří nízké výrobní časy, odolnost vůči otěru a jakost tvářeného povrchu závitu a vyšší geometrická přesnost, což umožňuje minimální

chyby přímosti boku a stoupání závitu [62]. Všechny výše jmenované výhody přispívají k tvrzení, že tvářené závity jsou odolnější vůči zatížení než obráběné závity, i z tohoto důvodu začaly firmy v automobilovém průmyslu na blocích motorů nahrazovat řezané závitové spoje tvářenými.

I technologie tváření závitu má své nevýhody, jakými jsou drsnosti povrchu závitu, jeho tvarová nepřesnost v prohlubních a vrcholcích závitu. Mnohem častěji, než vnitřní závit, se tváří závit vnější. Dochází k tomu zejména z důvodu jednoduššího technologického procesu. Při výrobě vnějšího tvářeného závitu se využívá procesu válcování závitu plochými nebo kotoučovými válcovými čelistmi [63]. Kromě válcovacích strojů lze využít i obráběcí soustruhy k výrobě vnějších tvářecích závitů.

V případě technologie vnitřního tváření závitu jsou tvářecí závitníky vyráběny nejčastěji z rychlořezné oceli a bez drážek. Rychlořezná ocel umožňuje lepší obrobitelnost složitých tvarů, zaručuje přesnou konstrukci závitu a odolává vertikální změně směru v průběhu tváření závitu. Využitím *Physical Vapour Deposition (PVD)* povlaků se vyvažuje charakteristická nízká teplotní odolnost a relativně malá tvrdost rychlořezné oceli ve srovnání se slitými karbidy. Bez použití PVD lze počítat s poměrně nízkou životností závitníků. Kromě úpravy povrchu za pomoci tvrdých povlaků PVD se používají ještě ochranné povlaky, které zabraňují adhezi, difuzi, tvorbě hřebenových trhlin a oděru nástroje. Nejpoužívanějšími povlaky jsou TiN (nitrid titanu) a CrN (nitrid chromu) [64].

Speciální tvářecí závitníky s 3-5 mazacími drážkami se volí v případech, kdy se tváří materiál s nižší pevností a dobrou tažností (min. 10 %), jakými jsou např. slitiny mědi a hliníku, nebo oceli s pevností max. 500 MPa. Tyto mazací drážky slouží k lepšímu přívodu procesní kapaliny do místa kontaktu materiálu s břitem závitníku. Výběžky na zkosené délce odolávají největším náporům síly, z důvodu působící plastické deformace doprovázené kontaktním tlakem způsobeným omezujícím elastickým zotavením v bodě kontaktu s materiálem [65]. Ve vodicích drážkách působí třecí síly jako výsledek kontaktu s pružnou částí materiálu.



Obr. 7 Rozdělení vrchu tvářecího zubu na sekce dle využití – podle [66].

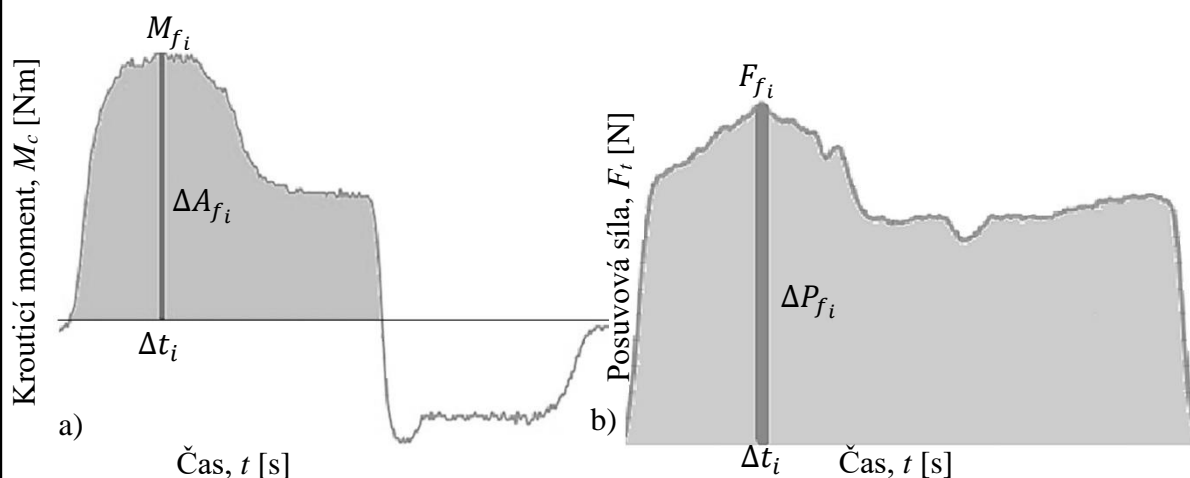
Pro názornost a vysvětlení funkce jednotlivých částí povrchu závitové sekce v průběhu procesu tváření závitu slouží obr. 7, který je rozdělen do devíti ploch. Kde přední plochy (označené písmeny A₁; A₂; A₃) provádějí plastickou deformaci materiálu. Omezení pružného zotavení materiálu bezprostředně po deformaci, mají za následek střední plochy (B₁; B₂; B₃ plochy). Zadní plochy, označeny písmeny C₁; C₂; C₃, poskytují krátkodobou úlevu mezi povrchem závitníku a vytvořeným závitem. Odvození této teorie společně s přesnými modely a výpočtem se nachází v článku [67].

Tvářet vnitřní závit lze jenom do předvrtané díry s přísnými tolerancemi (přísnějšími než u obráběných závitů) o velikosti jmenovitého průměru předvrtaného otvoru menšího, než je jmenovitý průměr závitníku. Výběr vrtáku je zásadní pro udržení správného procenta výšky závitu. Přesné rozměry jsou určeny normami, taktéž je možné využít doporučení výrobců závitníků. Na obr. 8 je zobrazen charakteristický profil tvářeného závitu. Je zde viditelný charakteristický dělený hřeben vrcholů závitového profilu tvářeného závitu, který oslabuje celkovou pevnost závitu kvůli jeho náchylnosti k odštěpování se. Velikost děleného hřebene je přímo závislá na průměru předvrtaného otvoru. V průběhu procesu tváření je závitník vtlačován do materiálu, který působením tepla vzniklého procesem měkne a kontinuálně natéká rovnoměrně do obou stran profilu závitu (probíhá zde v podstatě kalení za studena) [66]. Jednotlivá vlákna tvářeného závitu nejsou přerušena, ale na rozdíl od řezaného závitu jenom deformována. Tyto deformace mají za následek zvýšení pevnosti tvářeného závitu. Pokus nejsou obě strany vůči sobě symetrické, pak došlo k chybě v průběhu procesu, která mohla být způsobena nedostačujícím mazáním.



Obr. 8 Profil tvářeného závitu s hranicemi deformovaných oblastí [68].

Ačkoli se samotné zkoušky tváření vnitřních závitů provádí na různých strojích, všechny mají stejný princip založen na měření krouticího momentu v průběhu tváření závitu závitníkem s obdobnou časovou řadou krouticích momentů a působících tvářecích sil, z nichž se dále dají spočítat energetické náročnosti daných procesů (obr. 9 a; b). (Pro značnou analogičnost s řezným procesem prořezáváním závitu řezacími závitníky, lze užít k výpočtu obdobné konstanty, jak u procesu řezání závitů.)



Obr. 9 a) Graf funkce krouticího momentu v závislosti na čase;

b) Graf funkce tvářecí síly v závislosti na čase.

Energie z krouticího momentu (obr. 9a) se vypočítá za pomoci vzorce (1.1) a energie pro tvářecí síly (obr. 9b) lze vypočítat podle vzorce (1.2) [69]:

$$A_f = \int_0^T dA_{f_i} \cong \sum_{i=0}^T \Delta A_{f_i} \cong \sum_{i=0}^T \frac{P_{f_i} \cdot \Delta t_i}{9,55} \cong \sum_{i=0}^T M_{f_i} \cdot \frac{\Delta t_i \cdot n}{9,55} \quad (1.1)$$

$$A_e = \int_0^T dP_{f_i} \cong \sum_{i=0}^T \Delta P_{f_i} \cong \sum_{i=0}^T \frac{F_{f_i} \cdot \Delta v_{f_i}}{60\,000} \cong \sum_{i=0}^T F_{f_i} \cdot \frac{\Delta t_i \cdot n \cdot f}{60\,000} \quad (1.2)$$

2.2.2 Testy tváření závitů v laboratořích

Samotnou zkoušku tváření závitníků je možné kromě CNC strojů a stolních vrtaček provádět i na menších moderních zařízeních, které lze provozovat v laboratorních podmínkách. Jedním z příkladů provedení zkoušky závitníku v laboratořích je využití vysoce výkonného víceúčelového přístroje *Falex*. V případě přístroje *Falex* jde o flexibilní testovací nástroj pro simulaci jakýchkoliv tribologických operací, které zahrnují namáhavé průmyslové operace se zaměřením na válcované i rolované kontakty, nebo procesy tváření závitů [70].

Přístroj *Falex* pro testování momentových účinků v průběhu tváření závitů se vyznačuje precizností a opakovatelností provedení zkoušek procesních kapalin. U samotného zařízení je možné si volit ze dvou rychlostních rozmezí a to 10–450 min⁻¹ nebo 20–900 min⁻¹. V průběhu testu se operace tváření závitu vykonává závitníkovou hlavou *Procurier*, zatímco se snímačem měří zatížení vytvářené krouticím momentem na matici polotovaru. Každá změřená hodnota krouticího momentu se zaznamenává, aby bylo možné ji vykreslit do grafu, nebo porovnat s referenčními hodnotami pro vyhodnocení testovaných mazacích vlastností procesní kapaliny [71]. Efektivita procesní kapaliny se posuzuje na základě výsledků z měření působících krouticích momentů podle normy ASTM D5619.

Norma ASTM D5619 popisuje laboratorní testy tváření závitů s předpokládanými výkony kapalin pro mazání kovů s cílem najít nejvhodnější kombinaci materiálu a procesní kapaliny. Jako hlavní funkce pro vyhodnocování testované kapaliny ve srovnání s referenční kapalinou slouží hodnoty průměrů naměřených krouticích momentů do bodu reverzního chodu pro řezání závitů tvářecím závitníkem. Výsledkem celého pokusu jsou vyhodnocené charakteristiky zkušebních tekutin za pomoci účinnosti krouticího momentu popisující kvocient referenční kapaliny a testované kapaliny [72]. Pro dosažení nejlepších výsledků pro praxi je doporučeno využívat v testech stejné kombinace materiálů a procesní kapaliny, jaké jsou používány ve skutečné aplikaci.

Dalšími přístroji, na kterých probíhá za laboratorních podmínek testování tvářecích závitníků jsou např. Istron 8874 nebo Pronic M400.

2.2.3 Testy tváření závitů na CNC strojích

Kromě laboratorních zkoušek se provádí zkoušky tváření závitu i na CNC strojích. CNC stroje se pro tváření závitu používají z důvodu simulace průmyslových podmínek, značnému rozsahu rychlostí a otáček, možnosti přesného ustavení obrobku a zajištění vystředěným závitníkem přesně do středu předvrtaných děr. Způsob testování na CNC strojích nezahrnuje citlivá zdoluhavá měření krouticích momentů, z toho důvodu se spíše volí krátkodobé zkoušky s velkou opakovatelností se zaměřením se na opotřebení, výkon povlaků, nebo tendenci ke slepování se na rozhraní nástroj obrobek [73].

2.2.4 Simulace tváření závitu

V některých případech je před samotnou výrobou tvářených závitů použito 3D simulace a analýze procesů prostřednictvím metod konečných prvků. 3D simulace se využívají zejména v případech, kdy je u specifických materiálů nutné provést analýzu účinků prostředí (napětí, přetvoření a správný tok materiálu v procesu zpracování) na parametry točivého momentu. Výsledky těchto analýz získané prostřednictvím 3D simulací napomáhají k vyrábění vysoce kvalitního závitu. V článku [74] byla využita 3D simulace i analýza procesu prostřednictvím metody konečných prvků pro tváření vnitřních závitů za studena v tuhých plastových materiálech pro získání informací o plastických i pružných deformacích. Získané informace z analýz a simulací posloužily k určení podmínek tváření tak, aby nedošlo ke kolizi stroje, ani zničení nástrojem a výsledkem byly kvalitní závity.

2.2.5 Opotřebení závitu a závitníku

Správný způsob chlazení a mazání procesní kapalinou spolu s vhodně zvolenými tvářecími rychlostmi má značný účinek na kvalitu výsledného povrchu závitu. Mezi poměrně časté chyby v průběhu tváření závitů, které vedou k poškození závitníků, patří chyby způsobené nevhodně zvolenou procesní kapalinou, nebo nevhodně zvolenými tvářecími podmínkami (jako např. nesoulad posuvu stroje se stoupáním závitníku, nevhodný průměr díry, vychýlení os závitu nebo otvorů atd.) [75]. Všechna zmíněná pochybení v procesu tváření závitů mohou způsobit adhezi, abrazi, prasknutí závitníku v kohoutku v tahu nebo ve stlačení, případně plastickou deformaci.

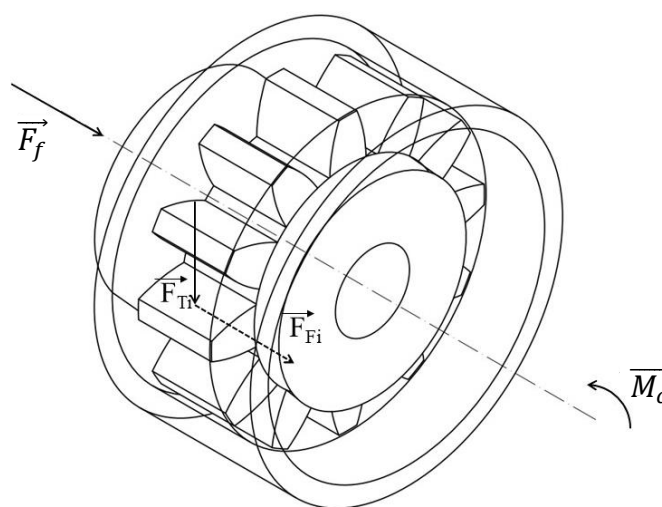
Plastická deformace se, mnohem častěji než na závitnících, projevuje na samotném závitu. Nesmí se opomíjet ani mazání v průběhu zpětného chodu závitníku. Pokud se v průběhu zpětného chodu závitník nemaže, nebo se maže jenom minimálně, může dojít k přilepení hrany závitníku k materiálu a pasivnímu zatížení, které vede ke zlomení tvářecího zubu [76].

2.3 Nekonenční testy

V této podkapitole jsou zahrnuty různé druhy jednorázových specifických testů, které nepatří k pravidelně používaným. Jde o různé testy, které se používají minimálně, nebo jenom jednou pro získání výsledků pro daný výzkum. Zaměřují se zejména na zkoumání koeficientů tření, analýzy opotřebení nástrojů i zkušebních ploch vzorků. Někdy jsou použité z časových důvodů, atypických zkušebních podmínek, nutnosti nasimulovat speciální výrobní podmínky v laboratořích, nebo jenom z nedostatku vybavení.

Jako příklad takovýchto testů byl zvolen test [29] založený na měření působení třecí síly na povrchu zubu spojky.

Zkušební zařízení (obr. 10) využívané v tomto experimentu sestává z otočné příruby připojené k pevné části zkušebního zařízení, kde je náboj upnut napevno a hřídel je spojena s ližinou, která se může axiálně posouvat za pomoci lineárního vedení. Hřídel je dále upnuta na tyč, na kterou lze umístit různé závaží generující sílu. Tato síla generuje krouticí moment (M_c), který zatěžuje spojku. Změnami hmotnosti závaží se mění zatížení spojky (avšak maximálně do 40 kg, což odpovídá krouticímu momentu 63 Nm) [29]. Zmíněné součásti jsou upnuty přes siloměr ke šroubovému zvedáku, který je ovládaný převodovým motorem. Ve chvíli, kdy se zvedák zatáhne, tak potlačí hřídel spojky s drážkami vzhledem k pevnému náboji a siloměr zaznamená potřebnou sílu pro daný úkon. Jde o měřenou třecí sílu (F_f), ze které lze následně vypočítat koeficient tření pro dané zkušební mazivo, nebo kapalinu.



Obr. 10 Schéma popisované spojky s hřídelí a působícími silami – podle [29].

Tento druh experimentu byl zvolen pro simulaci nepřeberného množství různorodých pracovních podmínek a parametrů, se kterými se může skutečná součást setkat v provozu. Proto byly dané testy prováděny v různých konfiguracích se změnami zatížení. Výsledkem všech testů [29] byl koeficient tření, který nabýval skutečných hodnot pro provozní podmínky, nebo další konstrukční návrhy strojů fungujících na podobných principech.

3 ZVOLENÁ METODIKA PRÁCE

Pro testování jednotlivých polymerních a nanoaditivních kapalin byla zvolena metoda tváření závitů, z důvodu její tepelné náročnosti a množství různých chyb a defektů, díky kterým lze na výsledných površích detekovat, zda daná kapalina mazala správně, nebo zda nastala chyba v procesu, která vedla k poškození nástroje nebo obrobku. Pro samotné měření bylo vybráno provedení testů na CNC stroji, z důvodu nasimulování průmyslových podmínek, rozsahu rychlostí a otáček, ale i snadného vystředění závitníku přesně na střed předvrtané díry. Samotné měření a následné vyhodnocování krouticích momentů i působících sil bylo realizováno na základě momentových a silových účinků působících na upínací hlavu, které byly detekovány dynamometrem. Změřená data byla podrobena hloubkové analýze jako, stejně tak i použité závitníky a vytvářené závity. Analyzovaly se celkové průběhy, opotřebení závitů a závitníků.

3.1 Použitý nástroj a materiál

Testovaným materiálem v průběhu všech zkoušek byla nízkolegovaná ušlechtilá křemíko-chromová ocel 54SiCRV6. Všechny použité vzorky pocházely z jedné šarže, aby bylo zamezeno ovlivňování měření rozdílnosti, ve vzorcích materiálů. Vzorky na testy byly dodány ve tvaru válečků válcovaných za tepla. Před upnutím do svěráku, byly ofrézovány plochy na tvar hranolů (viz obr. 11) o rozměrech 15x15x100 mm pro zajištění rovnoběžnosti ploch a zjednodušení upínání. Chemické a mechanické vlastnosti materiálu podle normy ČSN ISO 10089-03 [77] jsou uvedeny v tab 2 a v tab. 3.

Tab. 2 Chemické složení materiálu v hm. [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0,51-0,59	1,20-1,60	0,50-0,80	max 0,025	max 0,025	0,50-0,80	zbytek

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu

Parametr	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 min [%]	Z min [%]	[HV]
Hodnota	1650–1950	1600	5	35	248

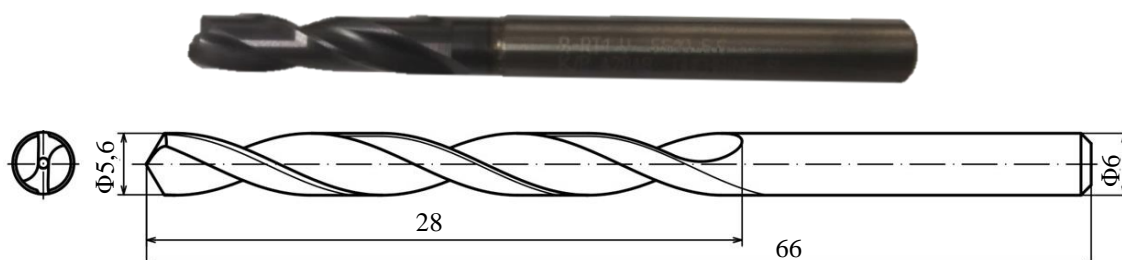


Obr. 11 Vzorové hranolové polotovary.

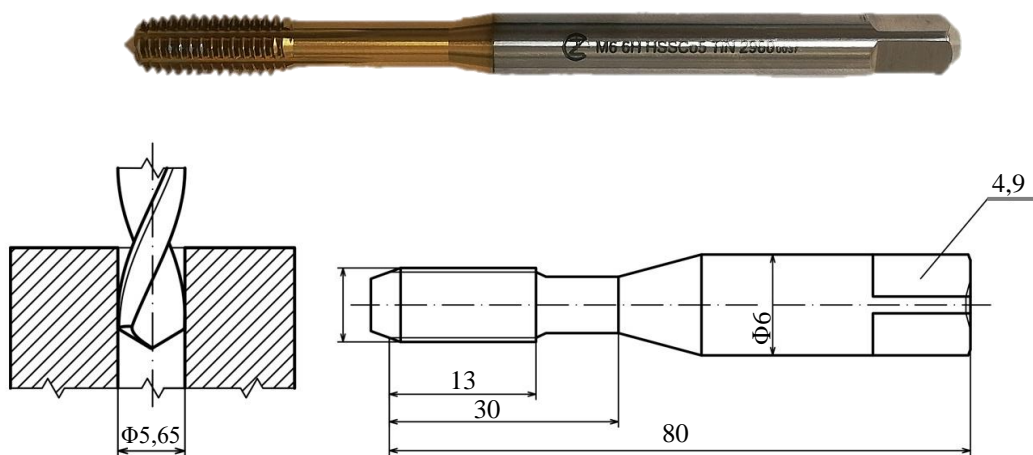
Před samotným měření jsou vyvrtány do polotovarů průchozí díry o velikosti 5,6 mm pomocí vrtáku DIN 6537K R RT100 HF 3XD od firmy Gühring (na obr. 12 jsou znázorněny všechny základní rozměry). Následně dochází k sražení hrany kuželovým záhlubníkem 2x90°. Poté byly všechny díry očištěny, vyfoukány a ucpány malými gumovými kruhovými ucpávkami, aby bylo možné je naplnit až po okraj zkoušenou kapalinou. Tento postup je

opakován v průběhu všech měření. Vždy se vyvrtala jenom jedna díra, která byla zahloubena, očištěna a až pak se do ní vytvářel závit. Všechno proběhlo v rámci jednoho CNC programu. Daný postup byl zvolen jednak z důvodu minimalizace jakéhokoliv vychýlení mezi osou nástroje a středovou osou vyvrtané díry, ale i pro ponechání časové prodlevy pro zchladnutí tvářecího závitníku před tvářením nového závitu (zamezení rozdílu v teplotách nástroje při tváření závitu u jednotlivých měření).

Vše bylo provedeno dle doporučení výrobců závitníků M6 H6 HSS Co5 povlakovaných nitridem titanu (TiN – charakteristická zlatá barva) pro tváření závitů do průchozích děr (obr. 13). Všechny závitníky jsou od jednoho výrobce závitníků, přesněji od České zbrojovky a.s., z jedné série, aby nemohlo dojít k ovlivnění výsledků experimentů. Každý má pět drážek pro vedení mazací kapaliny a jednotný úhel zúžení špičky závitníku se dvěma nedokončenými otáčkami šroubovice. Tyto závitníky byly testovány v minulé studii, ve které bylo zjištěno, že před svým poškozením jsou schopny vydržet několikanásobné dosažení maximálního krouticího momentu, řádově jde o téměř tisíce cyklů.



Obr. 12 Rozměry vrtáku – podle [78].



Obr. 13 Rozměry tvářecího závitníku – podle [79].

3.2 Testované kapaliny

V průběhu všech experimentů se zkoušely dvě nanoaditivní kapaliny a jedna polymerní kapalina v totožných koncentracích, a to až do chvíle poškození závitníku. V případech, kdy docházelo ke opakovaným poškozením závitníku bylo měření předčasně ukončeno. Testované látky byly dodány v 100% koncentracích, spolu se základními informacemi o nich a bezpečnostními listy. Nejdůležitější informace jsou zdůrazněny níže. Vzhledem ke

načernalé barvě obou nanoaditiv se předpokládá, že jde o nanoaditiva na báze grafenových nanočástic.

Nanoaditivní kapalina číslo 1 (dále v textu je značená jako **N1**).

Jde o vodou ředitelnou (emulzní) metalurgickou kapalinu, která se vyznačuje vysokou účinností proti opotřebení, tření a extrémnímu tlaku v tvářecích procesech. Garantuje zásadní prodloužení životnosti nástrojů, prevenci proti sváření výrobků i kvalitní povrchovou úpravu. Tato směs bez použitých olejů s přidaným grafitem je charakteristická tmavě šedou barvou s mírným zápachem po amoniaku. Hustota je $1,089 \text{ g/cm}^3$ při teplotě 60°F (respektive $15,6^\circ\text{C}$).

Nanoaditivní kapalina číslo 2 (používáno označení **N2**).

Tato vodou ředitelná metalurgická kapalina (na rozdíl od předchozí N1) nepodléhá hnilobě a nezpůsobuje kožní choroby, má charakteristickou šedou barvu i zápach. V tomto případě je předepsána hustota kapaliny $1,183 \text{ g/cm}^3$ při teplotě 25°C .

Polymerní kapalina (v dalším textu označována jenom jak **P**).

Jde o ve vodě rozpustnou chladicí i mazací kapalinu, podle výrobce je transparentní s charakteristickým zápachem. Je šetrná k životnímu prostředí (bez baktericidů, chloru, fenolů, dusitanů), její používání prodlužuje životnost strojů, má vynikající mazivost a ochranu proti korozi. Je používána jak u lehkých, tak také u těžkých operací, ať již spojených s operacemi tváření nebo obrábění. Hustota kapaliny je $1,060 \text{ g/cm}^3$ detekovaná při teplotě 20°C .

Míchání roztoků

Pro ředění roztoků byla jako ředící kapalina vybrána voda, protože je výrobcí považována za nejlepší rozpouštědlo pro nanoaditivní částice i roztoky bez povrchově aktivních látek a disperzí nanoaditiv.

Mísení jednotlivých testovaných kapalin s destilovanou vodou proběhlo ručně na základě hmotnostních procent s přihlédnutím na jejich refraktometrický faktor zjištěný z bezpečnostních listů. Ve všech listech byla hodnota faktoru 1,0 z toho plyne, že pro danou kapalinu není nutný žádný další přepočet. Pokaždé se na začátku nejprve měřily 100% kapaliny, až poté byly namíchány roztoky s 60 hm.%, 80 hm.%, 90 hm.%, 94 hm.% a 95 hm.% destilované vody.

Všechny roztoky byly namíchány ručně. Při každém míchání bylo dbáno na to, ať se nalévá měřená kapalina do destilované vody (nikdy ne obráceně, protože by mohlo dojít k usazeninám na dně, které by se nepromíchaly správně). Po nalití veškeré kapaliny do destilované vody byla následně celá směs důsledně několikrát protřepána ve vzduchotěsně uzavřené plastové láhvi.

Po řádném promíchání se počkalo zhruba 5 minut z důvodu ustálení směsi před měřeními. Nepoužívaly se kapaliny několik dní odstáté, protože se ve výrobě předpokládá nepřetržitý chod, a tím se odbourává možnost usazení částic směsi nebo oddělení jednotlivých složek od sebe.

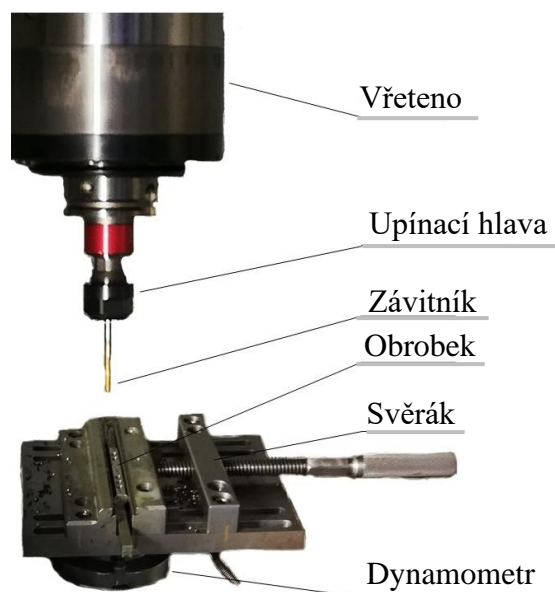
3.3 Měřicí sestava

Kompletní testování proběhlo na obráběcím stroji, konkrétně na portálovém obráběcím centru TAJMAC-ZPS MCV 1210 vybaveném řídicím systémem SINUMERIK 840, s maximálním zatížením 3000 kg. Umožňuje obrábět i složitější obrobky ve třech nebo pěti osách a s využitím vysokorychlostního obrábění. Tento typ obráběcího centra se vyznačuje i dobrými tlumícími vlastnostmi. Polohy ve všech v osách X, Y, Z jsou odměřovány absolutně, pohyby jsou zabezpečeny pomocí lineárního vedení s valivými elementy.

Všechny závitníky byly upnuty do upínací hlavy s bezpečností kleštinou vybavenou kompenzačním bezpečnostním aparátem specializovaným na kombinaci tah-tlak Franken KSN Synchro IKZ od firmy EMUGE. Ta pak byla za pomoci rychloupínacího držáku nástrojů s kuželovou stopkou typu HSK upnuta do elektronového vřetena o maximálním výkonu 32 kW s maximálními otáčkami $18\,000\text{ min}^{-1}$ a krouticím momentem 90 Nm.

Obrobek byl vystředěn a upnut do strojního svěráku upnutého přírubou, šrouby i upínkami na čelní plochu piezoelektrického křemíkového dynamometru KISTLER 9257B. Při umístění obrobku do svěráku bylo dbáno na to, aby byl umístění pokaždé přesně do středu dynamometru pro dosažení nejpresnějších výsledků. Z tohoto důvodu se po vytváření závitu posouval a znovu vystředoval obrobek ve svěráku.

Na obr. 14 níže je zobrazena celá výše popsaná sestava, která byla umístěná ve vaně, která sloužila na zachytávání přebytečné testované kapaliny, aby se nedostala do sběrné nádoby a vnitřního chladicího oběhu stroje. Přebytečná testovací kapalina zachycená vanou byla odvedena do sběrného kanystru pro nebezpečný odpad. Kromě dané vany je zachycený i způsob chlazení závitníku po celou dobu tváření závitu. Každý závitník byl před samotným měřením umyt, vyčištěn, pak řádně smáčen v právě testovaném roztoku. Tento roztok byl také použit k úplnému zatopení předvrtané průchozí díry ucpané zátkou, až pak bylo spuštěno samotné měření.

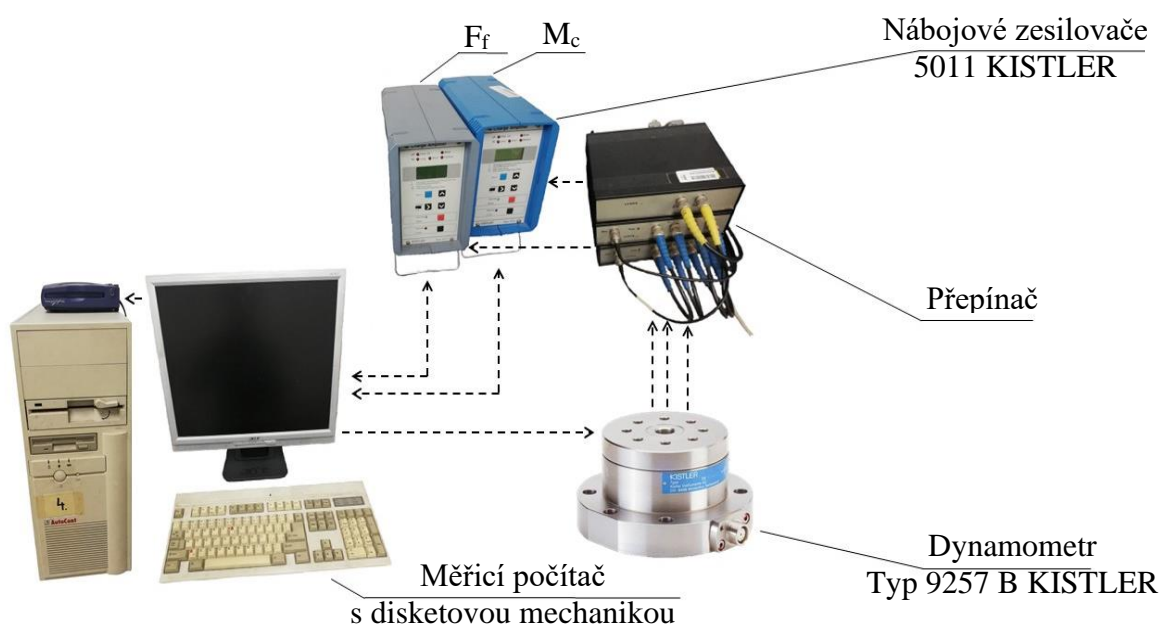


Obr. 14 Experimentální sestava tvářecího procesu.

Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B zachytával kompletně celý průběh tváření závitu za pomoci závitníku (konkrétně krouticí moment a tlakovou sílu). Tyto údaje byly následně za pomoci přepínače a nábojového zesilovače KISTLER 9011A zaznamenány do měřicího počítače.

K zaznamenávání byl použit program *Dynoware* pro analýzu síly a krouticího momentu při zatížení vzorku. V počítači bylo možné zobrazit grafické silové a momentové průběhy celého měření, které probíhalo se vzorkovací frekvencí 4 kHz.

Celé křivky grafických momentových a silových průběhů byly ukládány a následně nahrány na diskety pro další podrobné analýzy v programu *MS Office 365 Excel*. Celá sestava je zobrazená na obr. 15. Po provedení každé zkoušky byl pracovní prostor řádně odmaštěn a očištěn. Všechny zkoušky proběhly za konstantních pokojových teplot v rozmezí 20-22 °C.

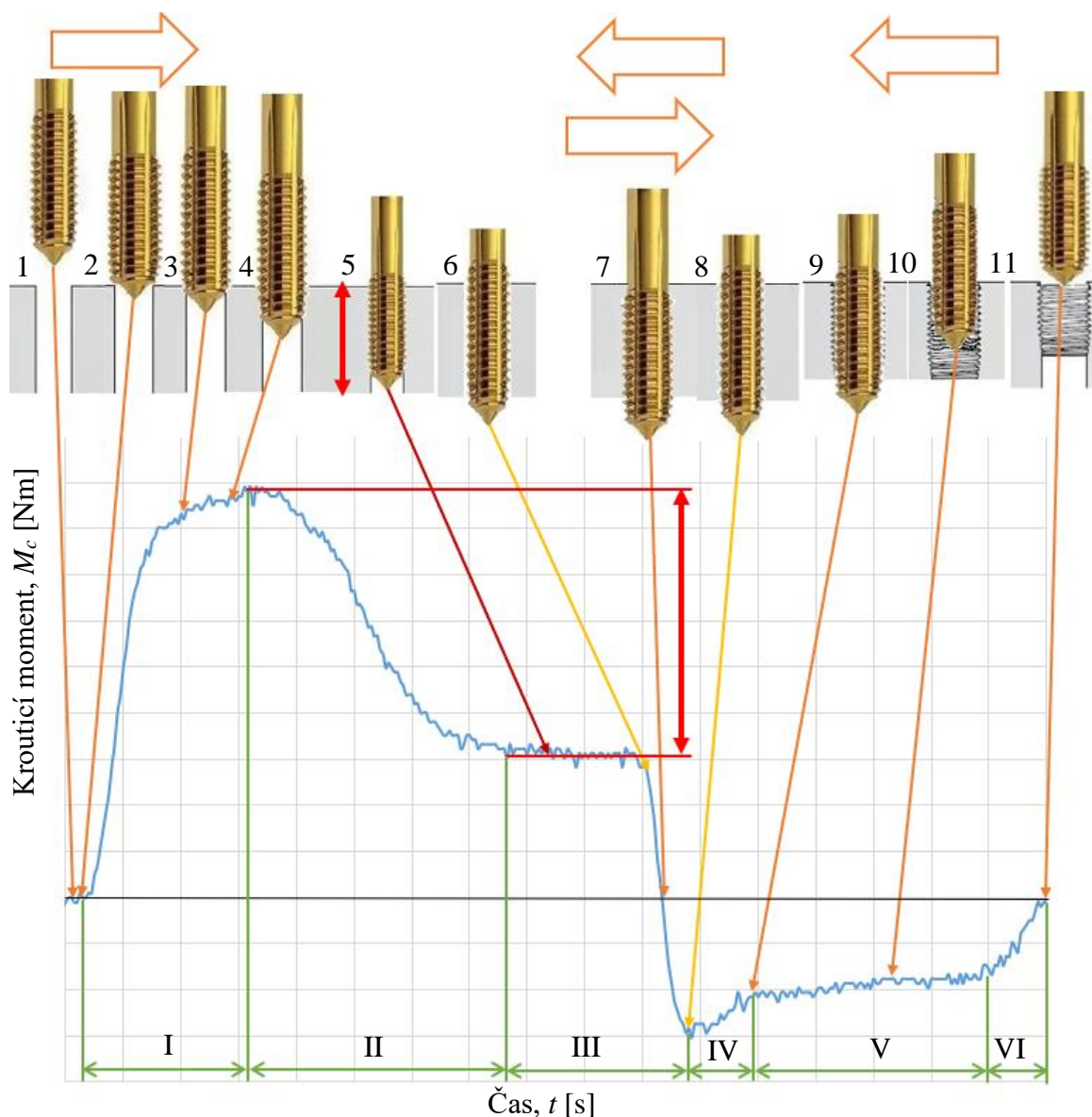


Obr. 15 Schématické znázornění měřící aparatury KISTLER.

3.4 Proces tváření závitů

Na obr. 16 jsou zobrazené charakteristické grafy krouticích momentů zaznamenávající dynamicky celý proces tváření závitu v průběhu času. Byly měřeny plné průběhy (jak tvářecí, s tvorbou závitu, tak i reverzační momenty s vyjetím nástroje ze záběru), které pro názornost popisu celého cyklu byly rozděleny do šesti různých fází (I-VI) – obr. 16.

Jednotlivé pozice tvářecího závitníku (1-11) ukazují na polohu nástroje v otvoru v daném okamžiku měření po celou dobu tvářecího cyklu. Od časového okamžiku nájezdu závitníku k obrobku (pozice 1) přes reverzaci chodu závitníku (pozice 6) až po výjezd závitníku ze závitu, a tím ukončení samotného měření - pozice 11 na obr.16.



Obr. 16 Časový průběh tváření závitu závitníkem.

V časové fázi I je zobrazen rostoucí krouticí moment od počátku po dobu, než kuželové zakončení závitníku pronikne dál do obrobku (pozice 3), čímž vytvoří první závit, a dále až do pozice 4. Po celou fázi I je vytvářen profil závitu kuželovou částí závitníku plastickou deformací materiálu. Na rozhraní fází I-II bylo dosaženo tváření závitu zahrnující mazací účinek kapaliny. Ve druhé fázi (II) je zaznamenán pokles krouticího momentu vlivem účinku mazacích vlastností dané kapaliny. Nejvýraznější pokles je zvýrazněn červenými šipkami jak pro polohu, tak pro měřenou hodnotu.

Tento pokles byl dále ustálen na téměř konstantní hodnotě vůči času ve fázi III, kde bylo dosaženo stabilních hodnot krouticího momentu tváření závitu. Ke konci fáze III bylo pozorováno pozvolné klesání krouticího momentu. Tento jev byl způsoben tvarem závitníkové části závitníku (v průřezu je tvořena pětiúhelníkem vepsaným do kružnice), díky

kterému byla vytvořena malá bezkontaktní oblast mezi obrobkem a materiálem pro působení testované kapaliny a mazání.

Pozvolné klesání krouticího momentu pokračovalo až do doby, než byl ukončen proces tváření závitu, což je charakterizováno výjezdem kuželového zakončení závitníku ven z průchozí díry (na obr. 16 tomu odpovídají pozice 6-7). Fáze I-III byly použity pro vyhodnocování částí krouticího momentu, zobrazující proces tváření závitu s charakteristickým účinkem procesní kapaliny.

Počáteční bod reverzace celého procesu je zaznačen pozicí 7 a dvěma protiběžnými šipkami na obr. 16. Od pozice 7 byl závitník postupným zpětným chodem vřetene vytažen ze závitu. Fáze IV, V a VI představují zpětný chod závitníku v již vytvořené stopě závitu. Po počáteční (minimální) hodnotě krouticího momentu ve fázi IV, pokračuje redukce krouticího momentu úměrná vzhledem ke zmenšující se kontaktní ploše mezi nástrojem a obrobkem. Tato přímá úměra byla zaznamenána až po časové rozhraní fází IV a V. Na počátku fáze V byl opětovně zaznamenán účinek testované kapaliny, který se projevil změnou krouticího momentu v pozici 8. Po celou dobu časové fáze V bylo patrné jen mírné stoupání jinak stabilního krouticího momentu až do fáze VI. Poslední VI. fáze byla charakteristická rostoucí hodnotou krouticího momentu až do doby, kdy kuželové zakončení špičky závitníku vyjíždí ze závitu, čímž končí fáze VI.

Celé měření bylo ukončeno na pozici 10, kde celý závitník vyjel ze závitu a byl momentově odlehčen. Pokud nebyly detekovány výrazné stopy opotřebení závitníku, tak pokračovalo další měření dané koncentrace testované kapaliny. Jestliže nedošlo k výraznému poškození závitníku, byla provedena minimálně tři měření pro každou koncentraci.

Všechna měření byla vyhodnocena podle postupu uvedeného v následující podkapitole.

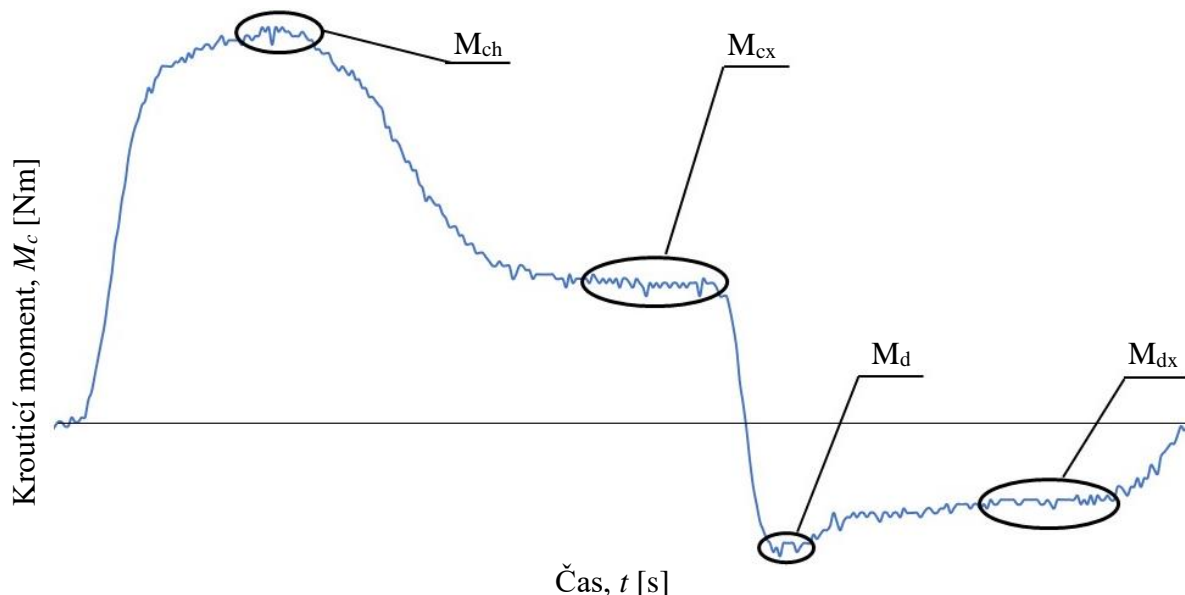
3.5 Vyhodnocování tvářecích procesů

Po každém měření byla provedena rychlá kontrola měření přímo na dílně. Ihned po měření byly kontrolovány naměřené momentové a silové grafické průběhy získané za pomoci piezoelektrického dynamometru KISTLER 9257B a zobrazené na měřicím počítači. Tato kontrola byla zaměřena zejména na úplnost a celistvost měření, odečtení hodnot maximálního krouticího momentu (M_{ch}) a minimálního krouticího momentu (M_d) na počátku reverzního chodu tvářecího závitníku. Pokud odečtené hodnoty M_{ch} a M_d nijak nevybočovaly z hodnot, které byly naměřeny v rámci jedné koncentrace, tak se po provedení tří měření pro danou koncentraci pokračovalo na další koncentrace.

V případech, kdy byly detekovány markantní rozdíly, nebo nesrovnalosti v grafickém průběhu momentových a silových účinků, se pokračovalo v měření a pro danou koncentraci byly vyhotoveny další jedno nebo dvě kontrolní měření, dokud nebyly výsledky prokazatelné.

Naměřené hodnoty byly následně zpracovány za pomoci statistických prvků, jakými jsou střední hodnoty maximálních a minimálních oscilujících hodnot (jejich směrodatné odchylky) vymezených intervalů v programu *MS Office 365 Excel*. Výběrové oblasti na obr. 17 představují statisticky významné intervaly hodnot pro další analýzu k odhalení účinků koncentrací zkoušených kapalin. Oscilace všech hodnot ve vybraných intervalech

bylo způsobeno změnami tření, které byly nejspíš zapříčiněny chybějící nebo přebytkovou testovanou kapalinou v místě kontaktu otvoru závitu a kohoutku závitníku.



Obr. 17 Vzorový graf znázorňující vyhodnocované veličiny.

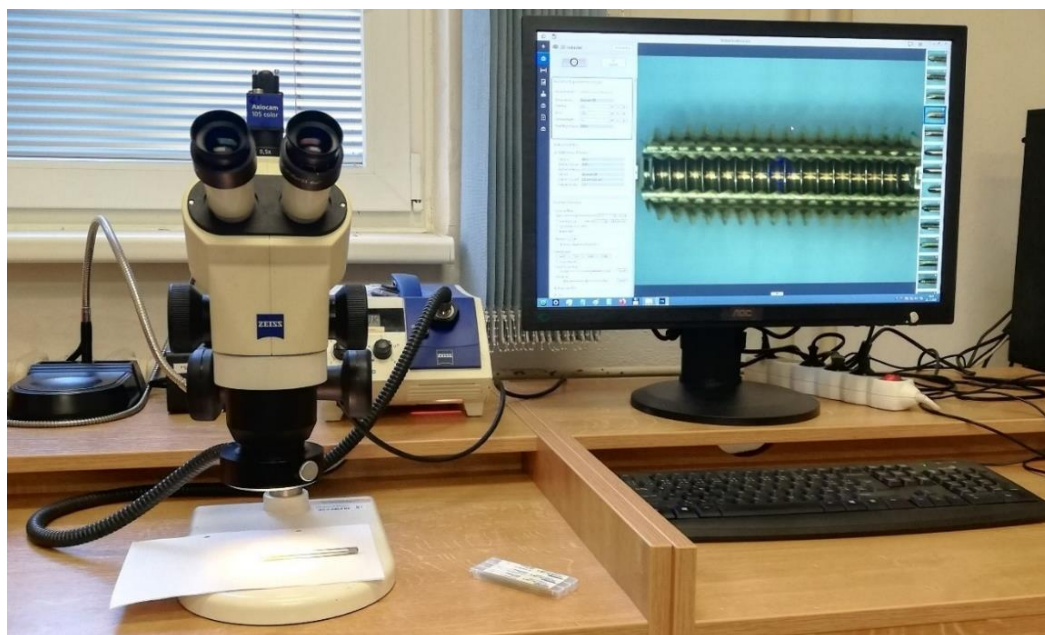
Zajímavými jsou zejména hodnoty M_{ch} a hodnota (M_{cx}), která udává, o kolik poklesl krouticí moment v průběhu tváření závitu (odráží účinek mazání).

To stejné bylo vyhodnocováno i v průběhu reverzního chodu tvářecího závitníku. V tomto případě však byly vyhodnocovány minimální hodnoty krouticích momentů. První hodnota M_d byla vypočítána z intervalu hodnot v úseku počátku reverzního chodu. Druhá střední minimální hodnota krouticího momentu (M_{dx}) byla z oblasti intervalu popisujícího vzrůst průběhu krouticího momentu v reverzním chodu tvářecího závitníku. Ve zkrácených názvech byl použit příznak x pro hodnoty poklesů v momentových průbězích.

Kromě výše zmíněných průměrných hodnot krouticích momentů se dále z naměřených hodnot vyhodnocovala spotřebovaná energie na vytvoření jednoho závitu z naměřeného krouticího momentu i působící síly podle vztahů uvedených v teorii (1.1), (1.2).

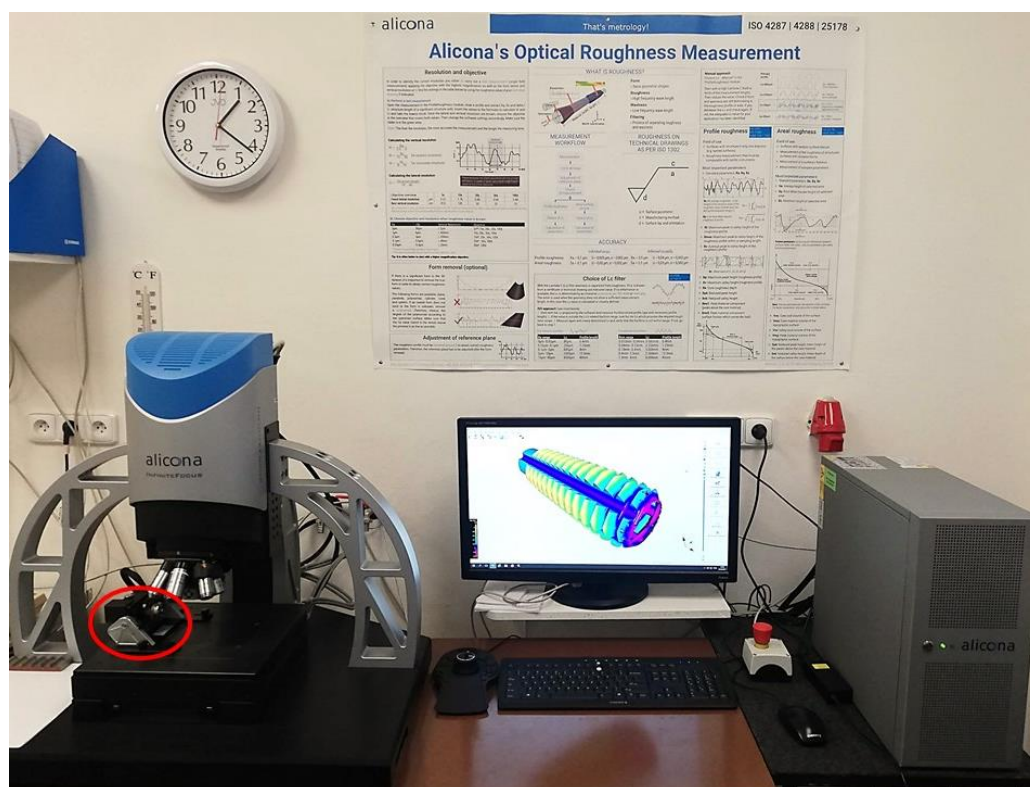
3.6 Hodnocení poškození závitníků

V průběhu měření docházelo k případům, kdy daná koncentrace kapaliny s jednou ze zkušebních látek nemazala dle předpokladů a došlo i k nevratnému poškození závitníku. Když k tomu došlo, byl závitník vyjmut z upínače a nahrazen novým, nepoškozeným kusem a doměřily se testy pro danou koncentraci testované kapaliny. Poškozený závitník byl řádně očištěn, zbaven zbytků testované kapaliny a následně prohlédnout pod světelným mikroskopem (obr. 18), zda je vážně poškozený. Všechny nalezené poškození byly nafoceny a zdokumentovány za pomoci světelného mikroskopu značky ZEISS Stemi 2000C s adaptérem s digitálním fotoaparátem (obr. 18).



Obr. 18 Světelný mikroskop ZEISS Stemi 2000C.

Pro hlubší prozkoumání poškození závitníku byly všechny poškozené závitníky naměřeny bezdotykovou metodou na přístroji IFM 5. generace od firmy Alicona. (obr. 19), která je založena na interferometrii bílého světla se zaostřenou variací. Naměřené závitníky bylo možné prohlédnout a proměřit v digitální verzi 3D obrázků na počítači.



Obr. 19 Alicona IF 5. generace.

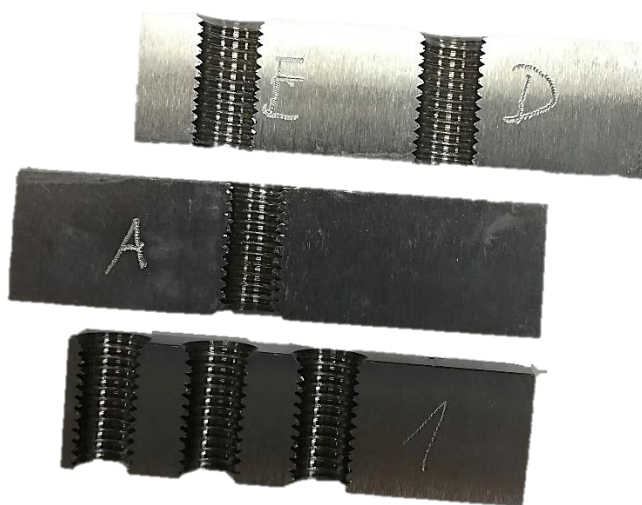
Z digitálních snímků bylo možné změřit rozsáhle poškození, porovnat nepoškozené závitníky s těmi poškozenými, a takto určit, jak moc se daný závitník poškodil, popřípadě co poškození způsobilo.

Při měření bylo zapotřebí dávat pozor na přesné upnutí nástroje do tříčelistového sklíčidla v rotační řídicí jednotce na přístroji Alicona IF G-5 (zvýrazněná na obr. 19 níže červenou barvou) a nasvícení závitníku. Samotný závitník je povrchově upraven, tento povrch způsobuje odlesky a odrazy světla, které se na snímcích můžou projevit jako defekty nebo tmavá místa. Tato skutečnost byla zohledněna při měřeních, z toho důvodu jsou snímky nasnímané bez počátečních závitů šroubovice na špičce nástroje.

Ze snímků zhotovených na světelném mikroskopu bylo patrné, že se špičky závitníků nepoškozuje, proto jejich vynechání ze snímání nemá účinek na vypovídající schopnost snímku.

3.7 Snímkování poškozených závitů

Pokud došlo k poškození závitníku, pak se označily poškozené závity na bližší prozkoumání. Po dokončení měření byly všechny závity náležitě očištěny. Z každého závitu byla podélně odfrézovaná jeho půlka, čímž vznikly podélné ploché vzorky pro elektronovou mikroskopii (obr. 20).



Obr. 20 Příklad vzorku závitů ze zkoušek pro SEM.

K pozorování závitů byl použit skenovací elektronový mikroskop (**SEM**) Tescan VEGA pracující s urychlovacím napětím 20 kV za použití SE i BSE detektorů. Všechny vzorky byly před snímáním závitů na SEM řádně očištěny. Čistění vzorků bylo provedeno individuálně pro každý vzorek. Nejprve byly vzorky ponořeny do acetonu a ponechány patnáct minut v ultrazvuku. Po patnácti minutách byl vzorek vyjmut z acetonu a vysušen vzduchem, opláchnut acetonem a znovu vložen do čistého acetonu. Tento proces byl zopakován tři - až pětkrát, pak se ještě dvakrát provedlo praní v izopropylalkoholu. Teprve takto očištěné vzorky byly vloženy do SEM.

Vyšetřovanou oblastí byly jednotlivé šroubovitě plochy závitu. Při zkoumání bylo zjištěno, že pokud nedošlo k poškození závitníku, pak i samotný závit byl bez poškození, nebo měl jenom nepatrné poškození. Zaznamenaná poškození se týkala zpravidla poškození

oblastí středních průměrů vyhovujících závitů (tzn. čtvrtý nebo pátý závit od okraje závitu). Z těchto důvodů byly pro všechny závity vyhotovené snímky ze SEM zejména pro tyto tři oblasti a pak byla analyzována všechna nalezená poškození závitu. Nejčastěji docházelo k plastickým deformacím ploch závitů. Snímky jsou součástí následující kapitoly.

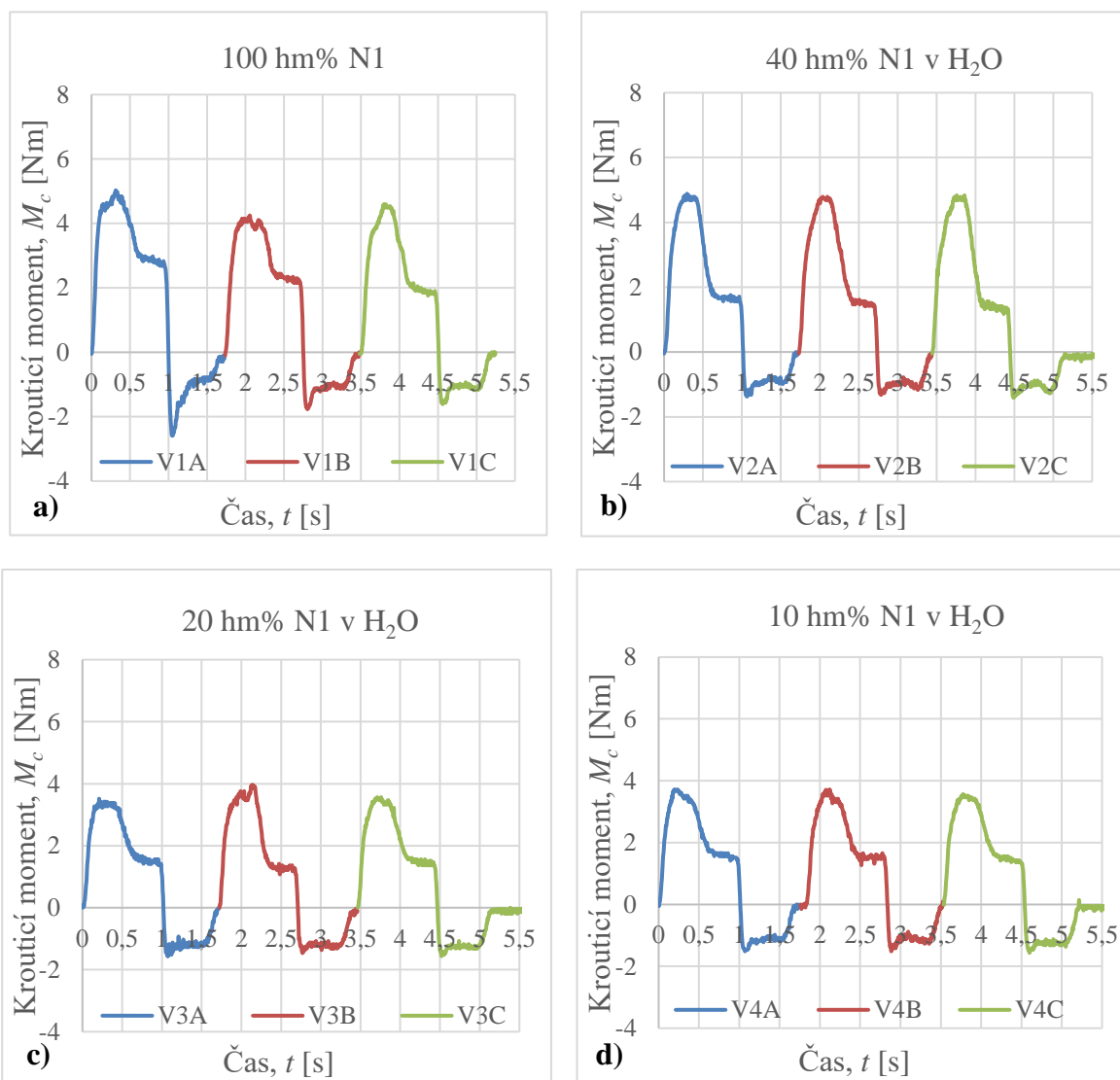
4 HODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Vzhledem k získávaným výsledkům v průběhu měření byly následně upravovány jednotlivé koncentrace, nebo úplně pozastaveno další testování. Závažným důvodem, proč se dále netestovalo, bylo soustavné poškozování závitníků. Jako další důvod lze uvést koncentrace testovaných kapalin na hranicích jejich možností mazání.

V této kapitole jsou podrobně rozebrány některé výsledky z měření, které poukazují na vlastnosti daných testovaných kapalin v průběhu zkoušek a jejich závislost na dané testované koncentraci. S ohledem na průměrnost rozsahu diplomové práce a neveřejnost některých výrobních údajů nejsou uvedeny všechny testované rozsahy.

4.1 Testování kapaliny N1

4.1.1 Grafy momentových průběhů



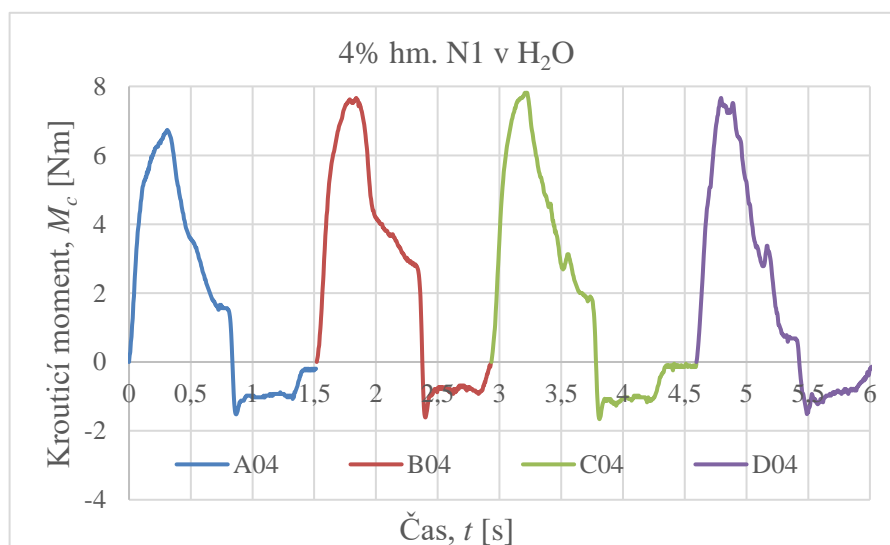
Obr. 21 Grafy průběhů krouticích momentů testovaných koncentrací N1 ve vodě.

První testovanou kapalinou byla šedá nanoaditivní kapalina (N1) s viskozitou podobnou medu. Při prvním testu, kdy byla použita její 100% koncentrace (obr. 21a), došlo k detekci výparů z místa tvářecího procesu v podobě bílého dýmu, který se po třech sekundách rozplynul. Kromě dýmu byl celý závitník včetně všech děr a bezprostředního okolí testů zamazán a zalepen testovanou kapalinou N1. Na grafickém průběhu prvního (obr. 21a) měření na rozdíl od ostatních byly znát nerovnoměrné výkyvy v měřeních maximálních a minimálních hodnot krouticích momentů (V1A-V1C), které byly následkem viskozity testované kapaliny a jejích adhezních účinků na nástroj a okolí. Už v tomto případě byl rozpoznatelný pokles hodnot v průběhu krouticího momentu zapříčiněný mazacím účinkem testované kapaliny, který byl podrobně charakterizován v kapitole 3.4.

Na základě výsledků prvního měření bylo rozhodnuto, že se v testech bude pokračovat pod 50 hm.% koncentrací N1 ve vodě. Toto rozhodnutí bylo provedeno z důvodu ředících účinků vody, čímž bylo dosaženo kapaliny o nižší viskozitě bez tendence k zalepování nástrojů, obrobků a svěráku. V případě zkoušek se 40 hm.% koncentrací N1 ve vodě bylo dosaženo jenom nepatrného dýmu, (který se ihned rozplynul) ke konci tvářecího procesu a na počátku reverzního chodu tvářeného závitníku i poměrně stabilních výsledků průběhů krouticích momentů, což znázorňuje graf na obr. 21b. Ve všech případech byly naměřeny celkem vysoké hodnoty maximálních krouticích momentů (M_{ch}) nad 4 Nm, ale poklesy krouticího momentu v druhé polovině procesu tváření závitu (M_{cx}) poukazovaly na lepší mazací účinky této směsi.

Až u 20 hm.% koncentrace N1 ve vodě (graf na obr. 21c) poprvé nebyly zaznamenány výpary. U této koncentrace bylo dosaženo poklesu M_{ch} pod 4 Nm, i když ve druhém měření byla hodnota M_{ch} jenom těsně pod touto úrovní. Hodnoty M_{cx} byly podobné jako v případě grafu na obr. 21b. Podrobné výsledky poklesů a vzrůstů hodnot M_{ch} , M_{cx} , M_d a M_{dx} byly zaznamenány do sloupcových grafů pro jednotlivá měření a vloženy do příloh (Příloha 1).

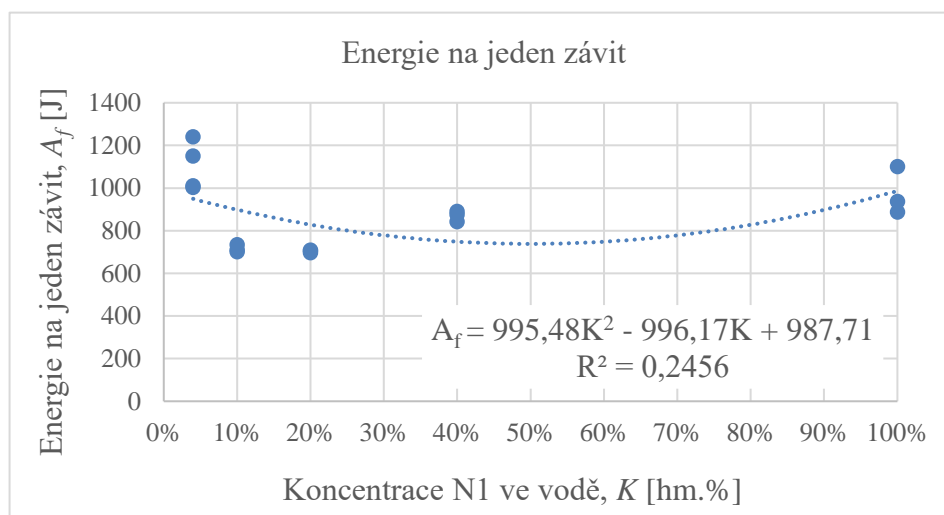
V případě 10 hm.% koncentrace N1 ve vodě nebyly detekovány žádné výpary, naměřeny hodnoty M_{ch} byly výrazně pod hranicí 4 Nm. Testovaná kapalina vykazovala nižší adhezní a viskózní účinky, než při předešlých měřeních, což bylo způsobeno zvýšenou koncentrací vody ve směsi.



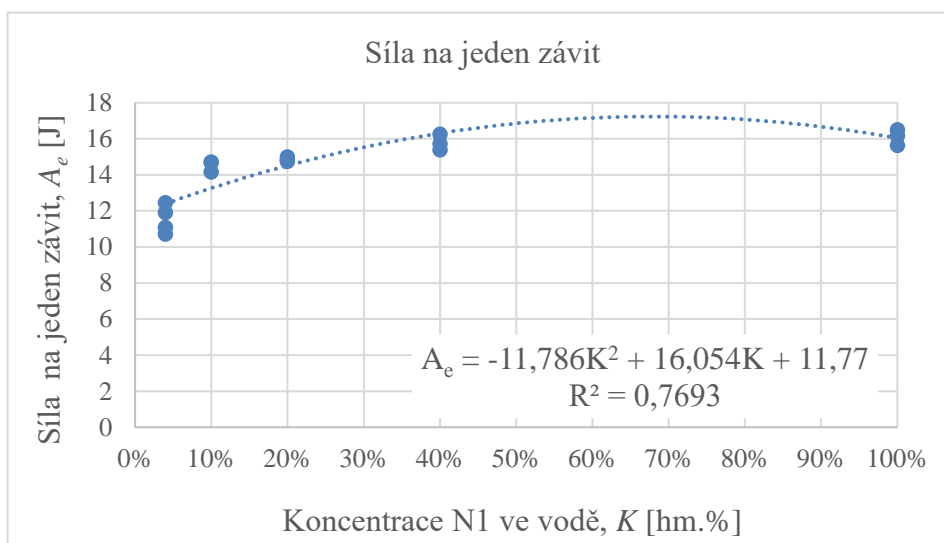
Obr. 22 Graf poslední měřené koncentrace N1 ve vodě.

Pro vyhodnocení účinků zvyšující se koncentrace vody ve směsi a změn průběhů krouticích momentů bylo pokračováno ve snižování koncentrace kapaliny N1 ve vodě až do doby, kdy bylo možné vidět poškození závitníku. Toto výrazné poškození tvářecího závitníku nastalo u koncentrace 4 hm.% N1 ve vodě, kde by se dalo říct, že šlo už spíše o mazání a chlazení čistou vodou než testovanou kapalinou. Jak bylo patrné v grafu na obr. 22, hodnoty M_{ch} zde přesahují hranici 6 Nm, někdy se blíží až k 8 Nm. Prvotní průběh momentu byl v prvopočátcích podobný předchozím měřením, ale u posledních dvou měření na obr. 22 byl jasně patrný průběh tváření závitu s poškozeným závitníkem. V průběhu posledního měření na obr. 22 byl vyroben závit, který jako jediný neprošel zkouškou správnosti výroby závitu za pomoci kalibru. V jednom případě bylo možné kontrolovat správným koncem zkušební kalibru závit jenom do poloviny délky závitu (velké poškození závitu až kuželová díra). Tento závit je znázorněn v Příloze 4. Poškozený závitník byl vyjmut z upínací hlavy, vyčištěn a prozkoumán v kapitole 4.1.3.

4.1.2 Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu



Obr. 23 Energetické náročnosti vytvoření závitů (podíl krouticího momentu).



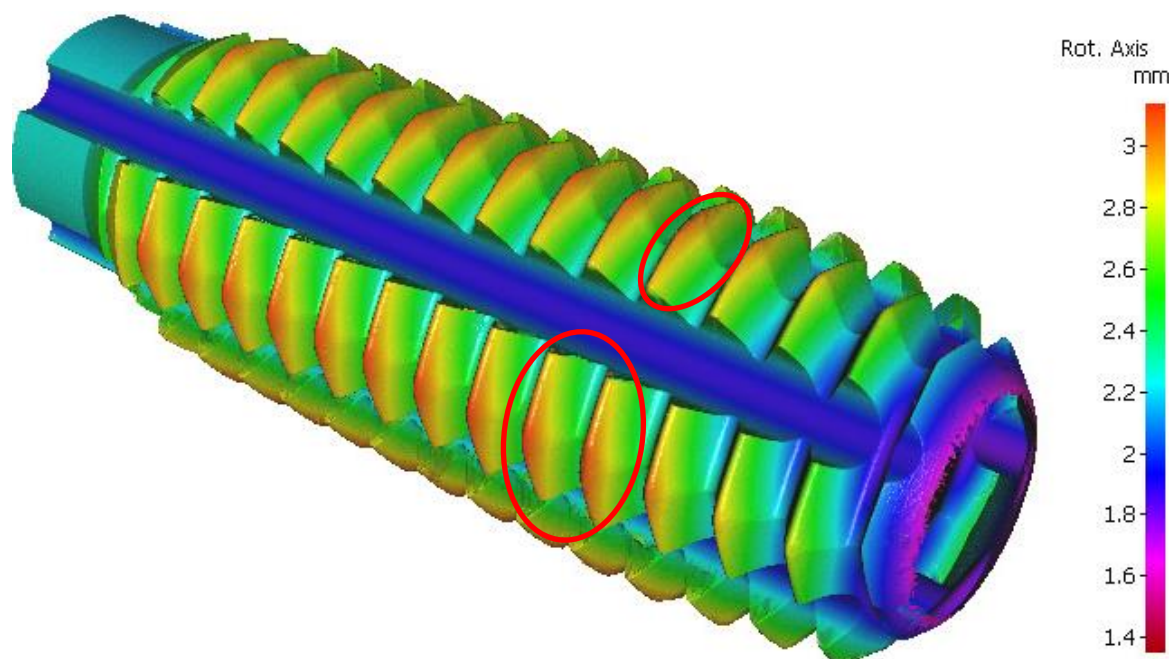
Obr. 24 Energetické náročnosti vytvoření závitů (podíl posuvové složky síly).

Energie pro vynesení grafů na obr. 23 a obr. 24 byly vypočítány na základě vztahů (1.1), (1.2) uvedených v kapitole 2.2.1. Tyto vztahy byly použity i pro všechny ostatní grafy energetických náročností v kapitolách 4.2.2 a 4.3.2.

Z porovnání obou grafických průběhů (obr. 23 a obr. 24) energetických náročností daného procesu plyne, že z ekonomického hlediska by bylo nejlepší se pohybovat v rozmezí 10-30 hm.% koncentrace látky N1 ve vodě.

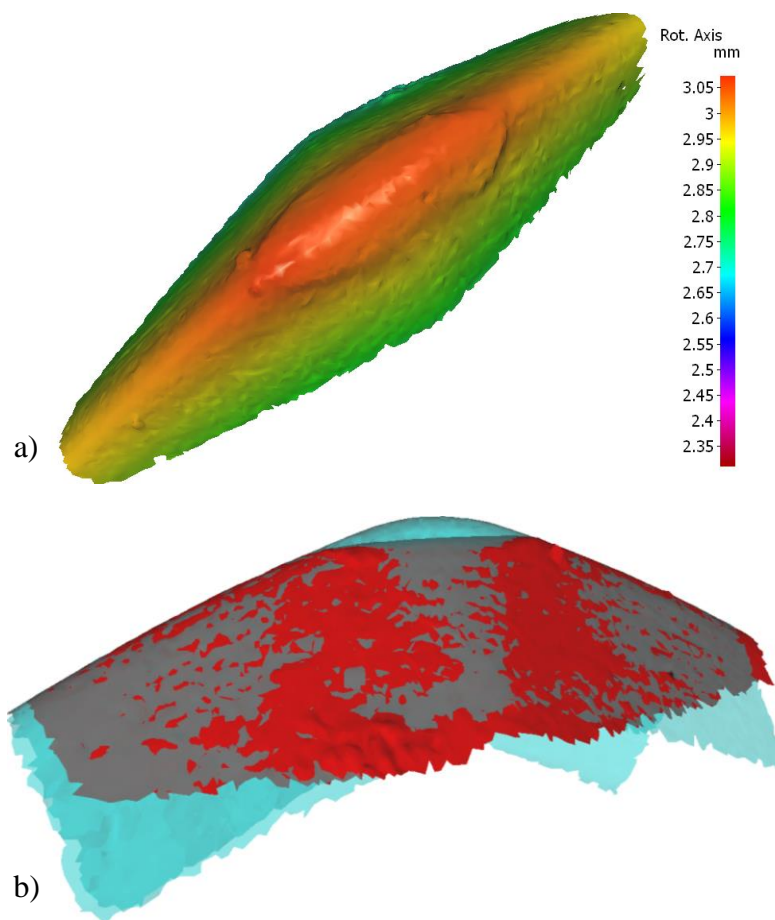
4.1.3 Poškození tvářecího závitníku

Při zkoumání úrovně poškození závitníků nasnímaných za pomoci Alicony IF 5G bylo zjištěno, že nejvíce poničené byly tvářecí zuby v páté až šesté řadě za sebou na šroubovici od počátku závitu (na obr. 25 byly vyznačené červeně). Podle rozsahu jednotlivých defektů bylo zřejmé, že nejprve byly poškozené zuby páté řady šroubovice. Až následně bylo dosaženo poškození i tvářecích zubů šesté řady, které převzaly funkci předchozích poničených zubů.



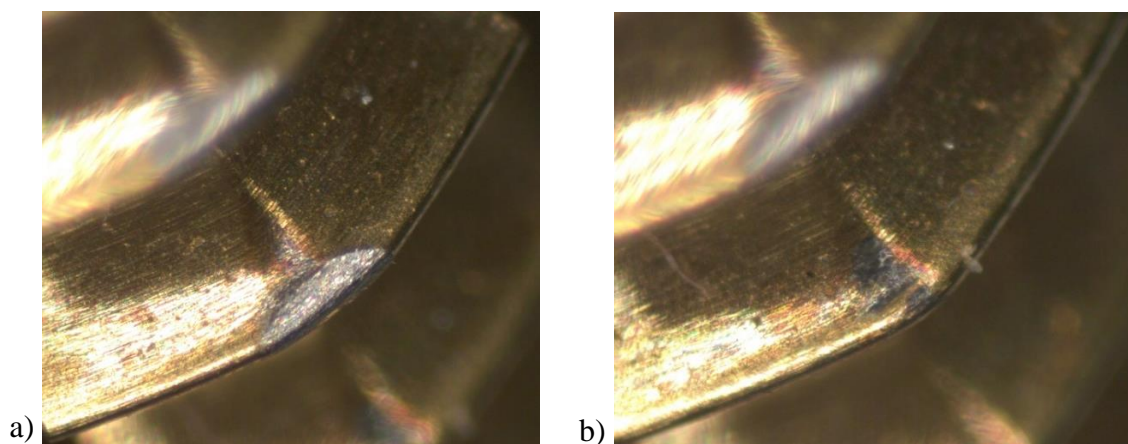
Obr. 25 Poškozený tvářecí závitník.

Vzhledem k tomu, že v tomto případě došlo jenom k nevýraznému poškození nástroje, tak byly dané defekty patrnější až po zvětšení konkrétního místa - obr. 26a. Místo s charakterově nejhorším poškozením bylo z obrázku digitálně vyňato (obr. 26a) a podrobno objemověmu porovnání s nepoškozeným tvářecím zubem (obr. 26b), kde byl červenou barvou vyobrazen poškozený tvářecí zub, a modrá barva byla použita ke znázornění nepoškozeného tvářecího zubu. Na obr. 26b je graficky znázorněno překrytí poškození tvářecích zubů. Po změření výšky od povrchu poškozené plochy tvářecího zubu k nejvyššímu bodu nepoškozeného tvářecího zubu byla zjištěna délka zdeformované části, která činila 60 μm . Poškozený tvářecí zub, který byl vybrán pro objemové porovnání, je vyobrazen na fotce z optického mikroskopu obr. 27a.



Obr. 26 Poškození jednoho zubu tvářecího závitníku.

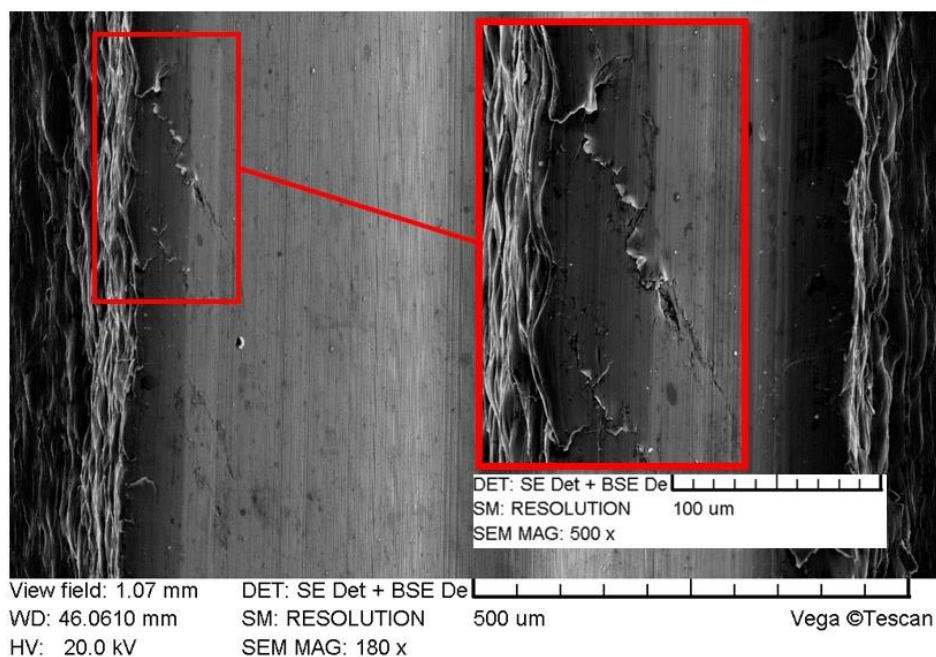
Kromě nasnímaní poškozeného závitníku za pomoci Alicony IF 5G, byly poškozené zuby nasnímány na optickém mikroskopu ZEISS Stemi 2000C. Tyto snímky byly pořízeny z časového důvodu (Jedno nasnímaní závitníku na Aliconě IF 5G zabere přibližně 12 hodin.), nebo kvůli poškozením, kdy byl odstraněn TiN povlak z tvářecího zubu závitu (obr. 27b). Tento druh poškození byl lépe viditelný na obrázcích z optického mikroskopu, byly zde patrné známky abraze a adheze.



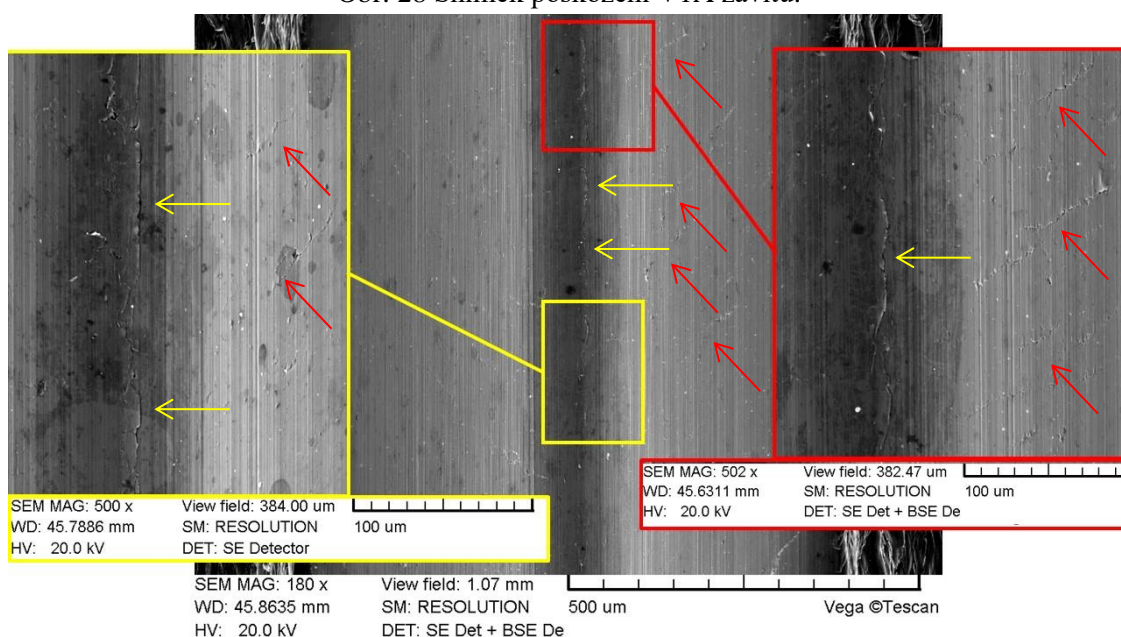
Obr. 27 Snímky poškození tvářecích zubů závitu.

4.1.4 Snímky povrchových struktur závitů

V této kapitole byly zobrazeny snímky z elektronového mikroskopu. Ze všech snímků byly vybrány charakteristické snímky pro danou koncentraci zkoušené kapaliny N1 ve vodě. Na obou obr. 28 a obr. 29 byly i po očištění zaznamenány zaschlé zbytky kapaliny N1, které bylo možné pozorovat i na všech dalších závitech z měření pro čistou N1 a 40 hm.% koncentraci N1 ve vodě. Ve vyznačeném červeném poli na obr. 28 byly patrné známky plastické deformace, které byly nalezeny na okrajích tvářených závitů v měřeních pro N1 a 40hm.% N1.



Obr. 28 Snímek poškození V1A závitu.



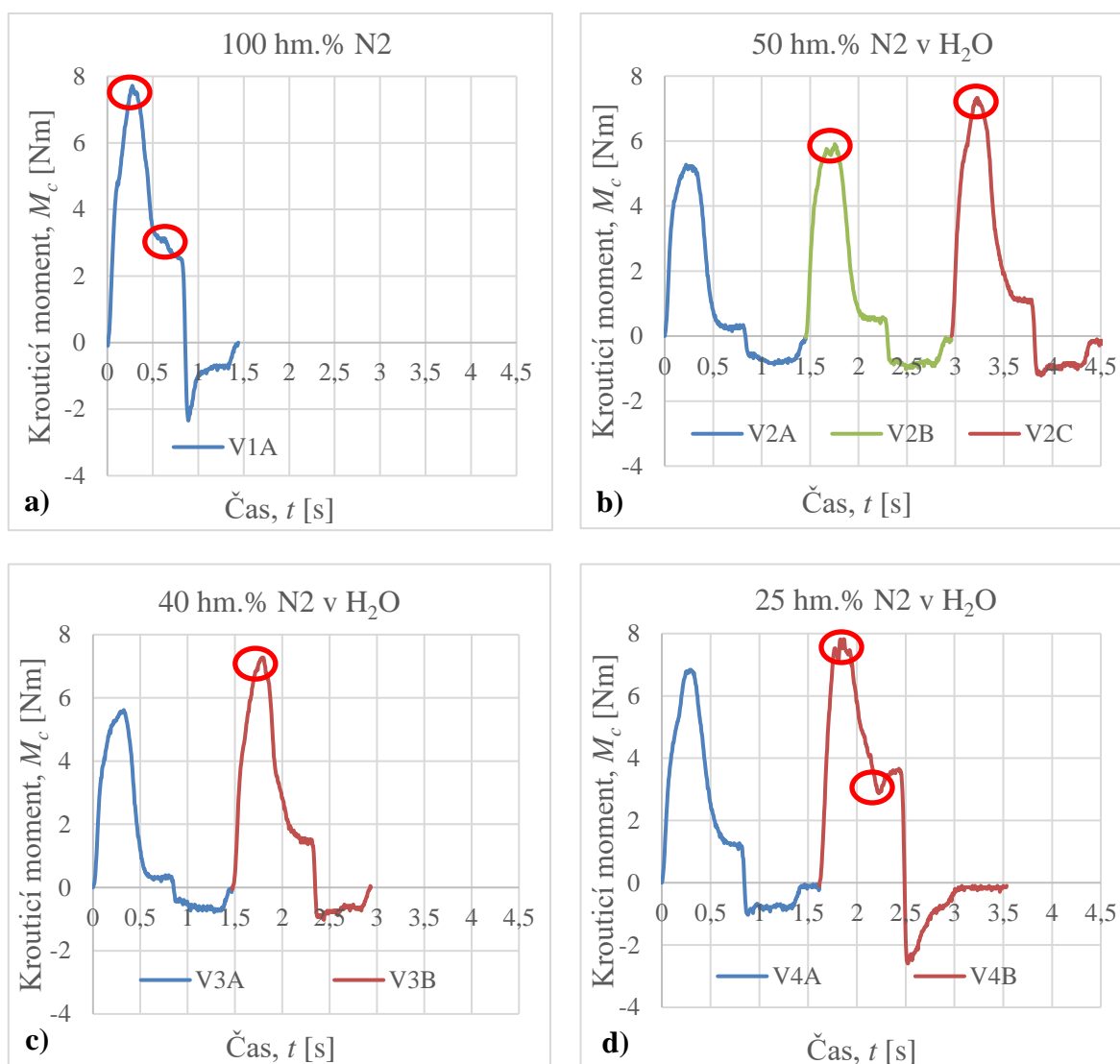
Obr. 29 Snímek poškození V3B závitu.

Na obr. 29 byly vyznačeny žlutou šipkou počáteční vlasové trhliny táhnoucích se středem závitů po celé jeho délce. Červené šipky byly použity pro zobrazení pravidelných šikmých vlasových trhlin o totožné tloušťce jako středové trhlinky.

Poškození závitů z posledních dvou měření pro 4 hm.% koncentraci N1 ve vodě byla natolik rozsáhlá, že jsou uvedena detailně v přílohách (Příloha 4).

4.2 Testování kapaliny N2

4.2.1 Grafy momentových průběhů



Obr. 30 Grafy průběhů krutících momentů testovaných koncentrací kapaliny N2 ve vodě.

Testovaná kapalina N2 byla tmavě šedé barvy a silně viskózní. Při přelévání jejího koncentráту do kádinky pro změření její hmotnosti byly viditelné jednotlivé nanoaditivní shluky v emulzi. V průběhu první poloviny měření čisté N2 kapaliny (obr. 30a) byl zaznamenán pronikavý skřípavý zvuk tření kovu o kov. Na základě detekce sluchem bylo předpokládáno poničení závitníku. Po ukončení měření byly detekovány na závitníku makroskopické deformace, které bylo možné pozorovat pouhým okem pod zbytkem

testované kapaliny N2. Podobně, jako tomu bylo u koncentrované kapaliny N1, i zde došlo k ucpání a zašpinění pracovního prostoru testovanou kapalinou.

Z důvodu poškození závitníku bylo ukončeno měření pro čistou testovanou kapalinu N2, pokračovalo se až po jejím zředění v poměru 1:1 s vodou. Naředěním kapaliny N2 vodou bylo dosaženo snížení její viskozity, která se dala přirovnat k medu. První měření V2A bylo provedeno bez komplikací (obr. 30b), proto bylo možné pokračovat druhým měřením, kdy byl zaznamenán nepatrný skřípavý zvuk. Vzhledem k hluku běžnému pro chod CNC stroje a otáček vřetene nebylo možné s určitostí říct, zda došlo k poškození závitu pouze na základě detekce sluchem. Proto byl závitník prohlédnut zběžně očima, nebyly zde detekovány deformace, tím bylo možné přejít na poslední měření. V posledním měření (obr. 30b V2C) byl jasně a zřetelně detekován skřípavý zvuk tření nástroje o kov, čímž došlo k makroskopickému poškození závitníku. Po analýze grafů krouticích momentů bylo evidentní poškození závitníku i ve druhém měření (obr. 30b V2B), které muselo být mikroskopického charakteru. Pokud by nedošlo k poškození závitníku, bylo by s velkou pravděpodobností možné dosahovat zajímavých výsledků mazacích účinků, jehož v této části byly naměřeny hodnoty M_{cx} pod 1 Nm. Takto nízké hodnoty M_{cx} znamenají energetickou úsporu procesu.

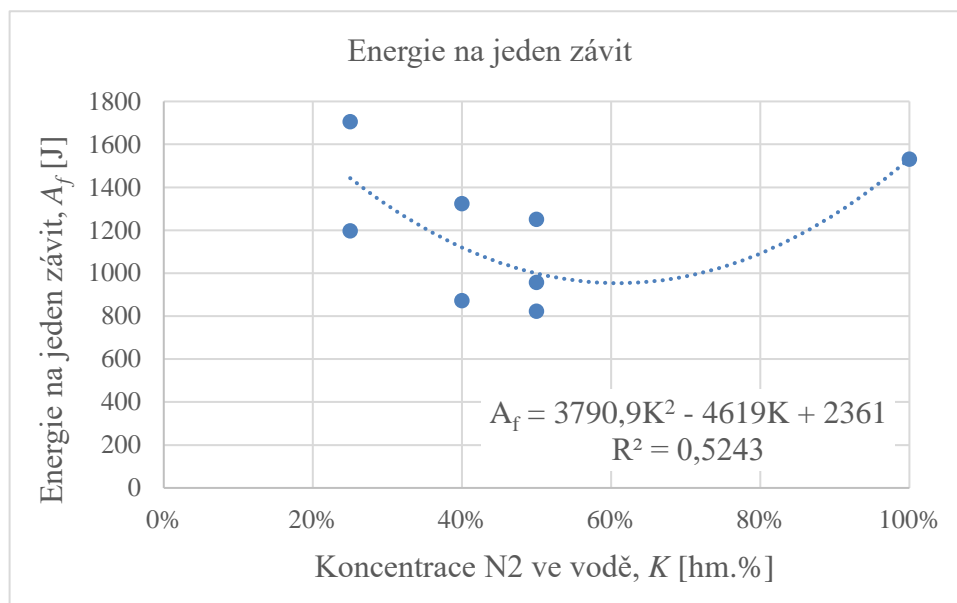
Vzhledem k prvnímu měření (V2A na obr. 30b) byla k následujícímu měření zvolena 40 hm.% koncentrace kapaliny N2 ve vodě. První měření (V3A na obr. 30c) bylo obdobné jako předchozí první měření u 50 hm.% koncentrace N2 ve vodě. I když byla již testovaná kapalina N2 méně viskózní než na počátku a nezanášela závitník ani obrobek, nebylo její testování úspěšné. Ve druhém měření V3B (obr. 30c) bylo opětovně rozpoznatelné charakteristické skřípání, které předznamenávalo poškození závitníku. Po uvolnění závitníku ze vzorku byly na závitníku snadno rozpoznatelné makroskopické deformace.

Poslední testovanou koncentrací byla 25 hm.% koncentrace N2 ve vodě (graf na obr. 30 d). Vzhledem k tomu, že její průběh měření byl obdobný jako u předchozích dvou koncentrací, byly po druhém měření, jehož výsledkem bylo zničení závitníku, testování této kapaliny ukončeno.

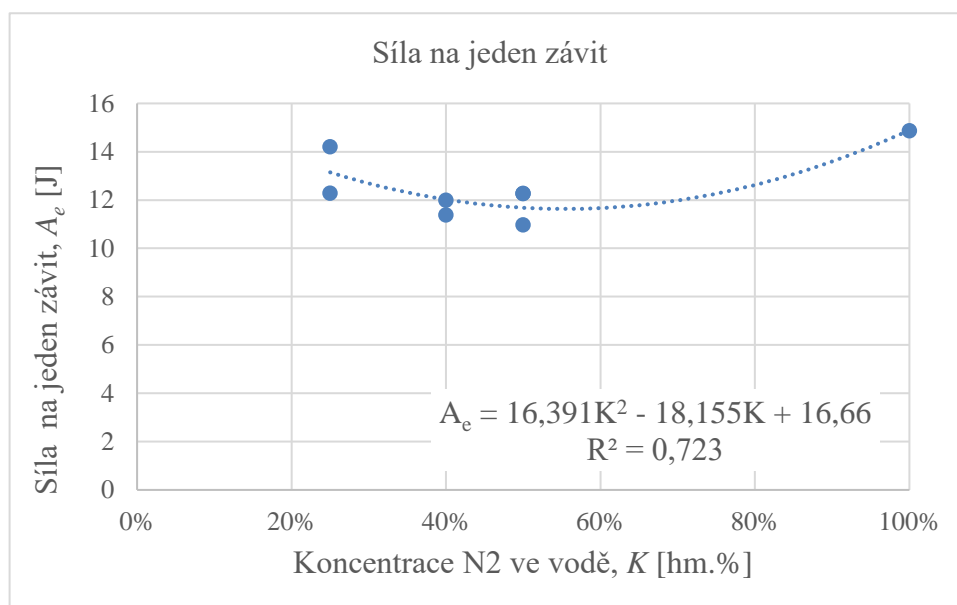
Do všech grafů byly červeně vyznačeny oblasti krouticích momentů, které znamenají poškození závitníku. Poklesy a vzrůsty hodnot M_{ch} , M_d , M_{cx} , a M_{dx} , krouticích momentů je možné nalézt a porovnat s předchozím měřením v příloze 2.

4.2.2 Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu

Z grafického průběhu energetické náročnosti na vytváření jednoho závitu za pomoci krouticích momentů (obr. 31) bylo zjištěno, že by optimální koncentrace N2 v kapalině ve vodě měla být kolem 60 hm.%. S přihlédnutím k odpovídajícím hodnotám energie (vypočítané z posuvové síly – obr. 32) se tato optimální koncentrace posunula do rozhraní 50-60 hm.% koncentrace kapaliny N2 ve vodě. Z tohoto důvodu bylo nejlepších výsledků dosaženo kolem 50 hm.% koncentrace kapaliny N2 ve vodě.



Obr. 31 Energetické náročnosti vytvoření závitů (vypočítané pomocí krouticího momentu).

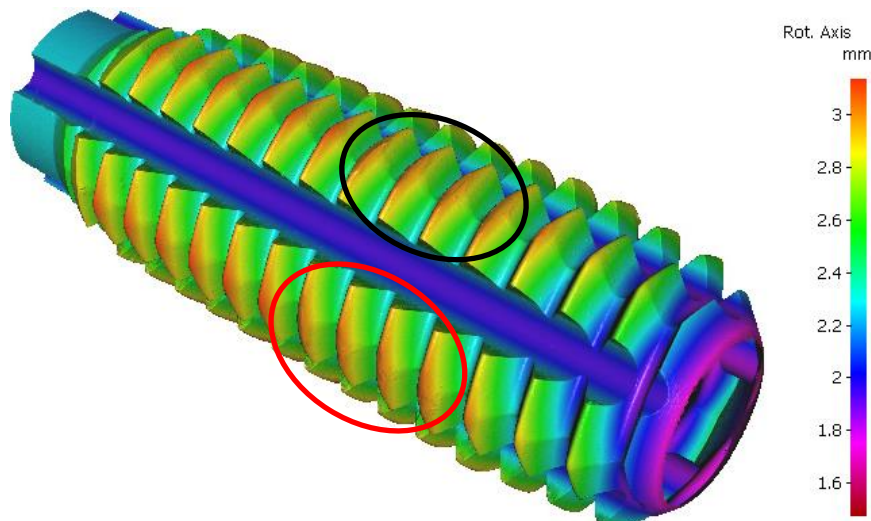


Obr. 32 Energetické náročnosti vytvoření závitů (vypočítané pomocí posuvové síly).

4.2.3 Poškození tvářecích závitníků

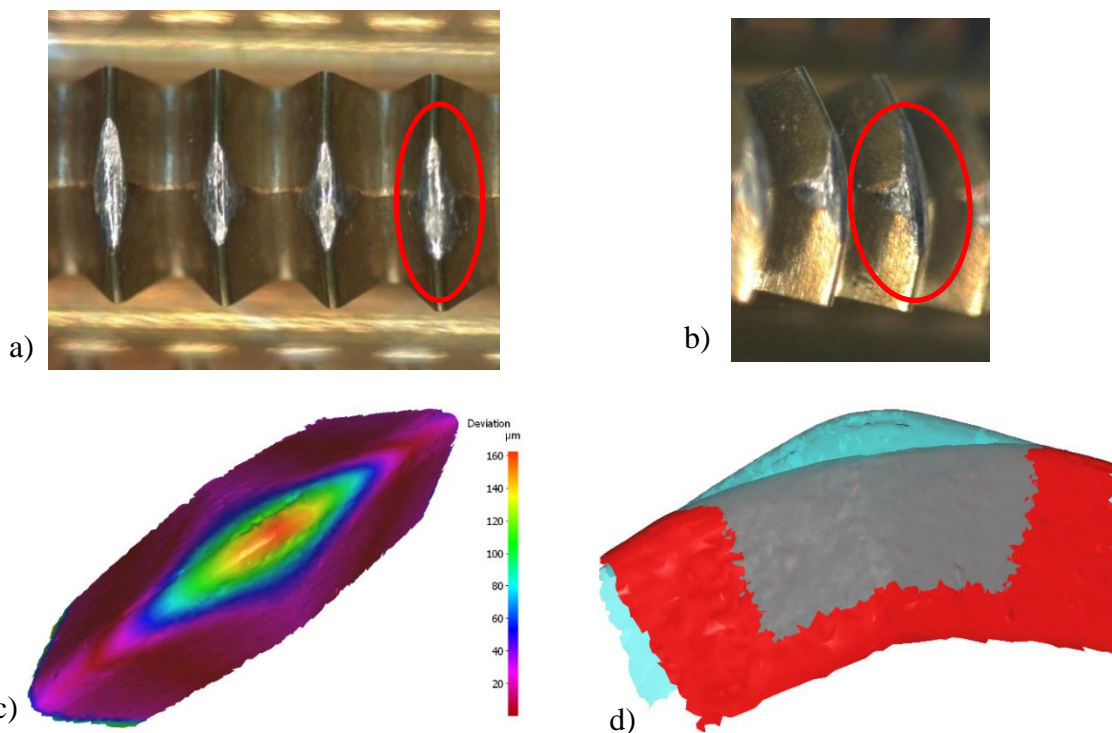
Při zkouškách s kapalinou N2 byly v každém měření poškozené závitníky. Na obrázcích níže budou postupně po daných koncentracích vyobrazeny snímky jednotlivých poškození. Pro zrychlené porovnání rozsahu poškození byly závitníky vyobrazeny vždy právě z té strany, kde docházelo k největším poškozením v řadě za sebou jdoucích tvářecích zubů a byly natočeny tak, aby byl evidentní rozsah opotřebení tvářecích zubů (obr. 33, 35, 38 a 41). Nejvýraznější poškození u všech závitníků vykazovaly tvářecí zuby páté řady od počátku šroubovice, které v některých měřeních přišly o téměř třetinu výšky. Poté, co byla účinkem deformace znemožněna jejich práce na tváření závitu, převzaly tuto funkci tvářecí zuby v šesté řadě od počátku šroubovice závitníku. Místa poškození závitníku byla označena

na snímcích červenými elipsami níže. Černé elipsy zobrazují jenom další řady poškozených tvářecích zubů. Nejčastěji bylo detekováno abrazivní a adhezní poškození.



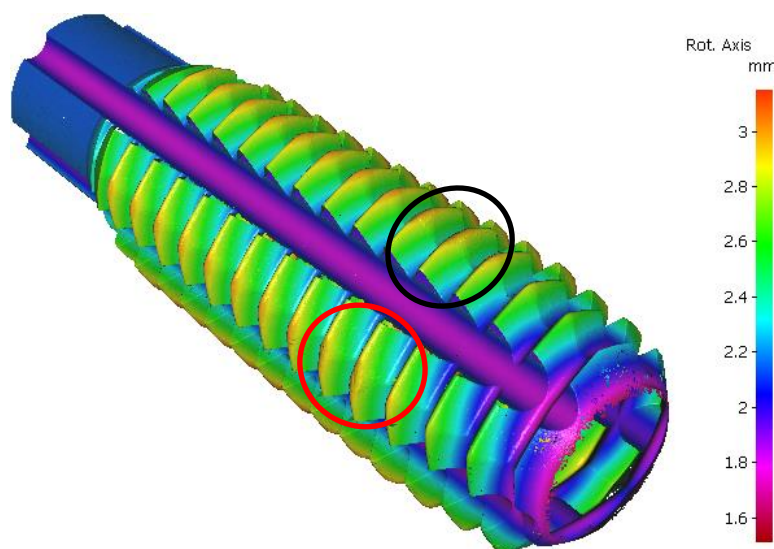
Obr. 33 Poškození závitníku z měření koncentrované N2.

Na obr. 33 byl zobrazen poškozený tvářecí závitník po vytváření jednoho závitu při koncentrované kapalině N2. Kromě poškozených pátých a šestých tvářecích zubů je evidentní opotřebování i na čtvrtém, sedmém a osmém tvářecím zubu v řadě za sebou po celém obvodu šroubovice. Tato rozsáhlá poškození závitníku vznikla po vytváření jednoho závitu (což byl proces na CNC stroji trvající přibližně 1,5s), proto, že po poškození řady tvářených zubů tyto zuby předaly svou funkci následujícím řadám zubů.



Obr. 34 Poškození tvářecích zubů po vytváření jednoho závitu.

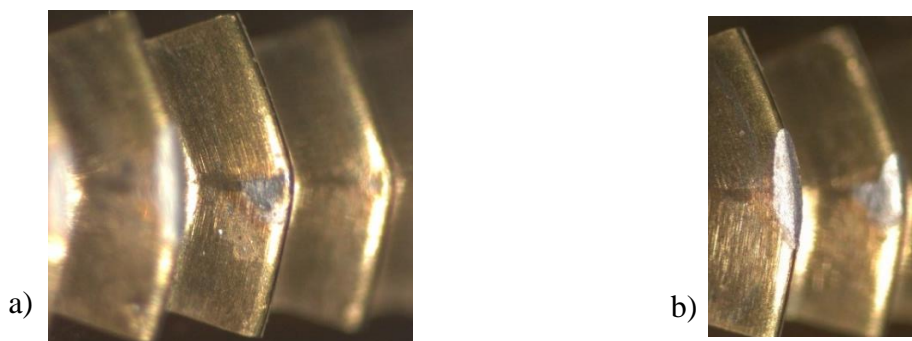
Na obr. 34a je zobrazena řada červeně zvýrazněných tvářecích zubů z obr. 33, která byla snímkována na optickém mikroskopu. Bylo zde snáze detekovatelné rozsáhlé poškození tvářecích zubů. Z vyobrazených tvářecích zubů na obr. 34a byl vybrán pátý zub, který byl zasažen nejvíce (obr. 34b). Tento tvářecí zub byl nasnímán na Aliconě IF 5G pro změření hloubky opotřebení daného tvářecího zubu. Podle měření bylo opotřebení tvářecího zubu na obr. 34d v hloubce 155 μm , což bylo možné vyčíst z obr. 34c, kde barevná škála na pravé straně indikuje velikost deformací, na základě kterých se odlišuje opotřebovaný tvářecí zub (červená barva na obr. 34d) od nepoškozeného (modrá barva na obr. 34d).



Obr. 35 Poškození závitníku z měření 50 hm.% koncentrace N₂ ve vodě.

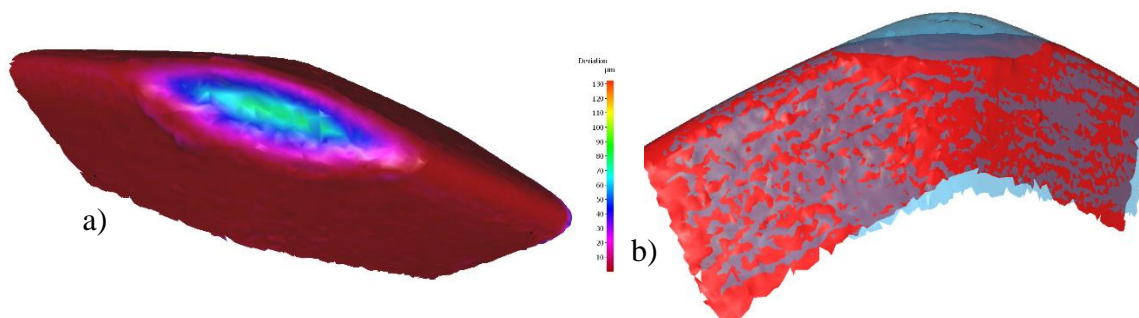
Obr. 35 byl typickým příkladem opotřebení, které bylo podrobně popsáno v úvodu této kapitoly. Nejpoškozenější byl pátý zub, a poté se až poškodil šestý zub, který převzal jeho funkci v procesu tváření závitů. Kromě nich byly ještě minimálně poškozené některé čtvrté zuby, ale jenom povrchově. Závitník byl poškozený v této míře po vytváření třech závitů, což je nejvyšší počet vytvářených závitů v průběhu testů s kapalinou N₂. U této koncentrace kapaliny N₂ bylo zaznamenáno nejvíce měření.

Snímky z optického mikroskopu (obr. 36a-b) byly použity pro zobrazení rozsahu poškození povlaků ze závitníku. Na prvním snímku zleva byl vyobrazen čtvrtý zub v řadě za sebou od počátku šroubovice, který kromě ztráty vrstvy povlaku nemá vážnější poškození.



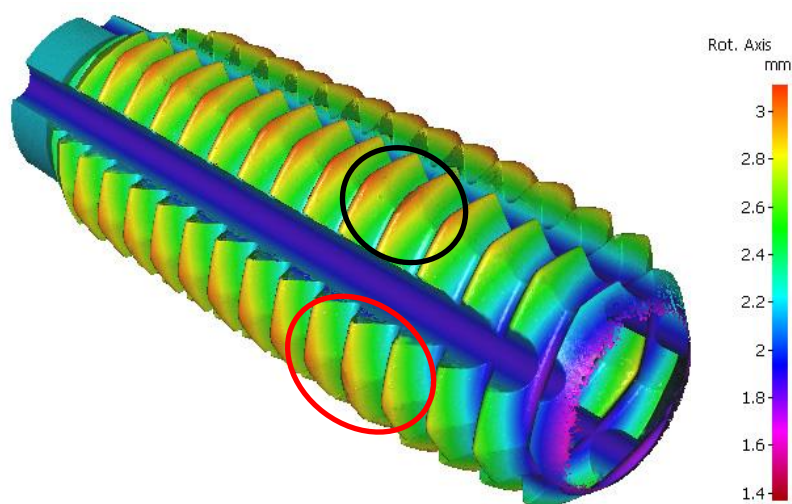
Obr. 36 Snímky poškození tvářecích zubů z obr. 35, vyhotovené na optickém mikroskopu.

Druhý snímek (na obr. 36b) zobrazuje pátý tvářecí zub v řadě od počátku šroubovice z červené elipsy na obr. 35, který byl vybrán pro analýzu hloubky opotřebení (obr. 37a-b). V tomto případě byla změřená hloubka opotřebení 95 μm .



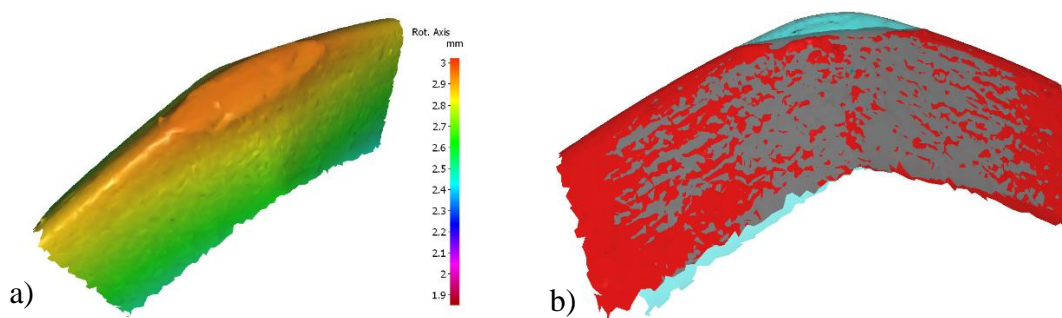
Obr. 37 Měření hloubky poškození tvářecího zubu.

V případě měření opotřebení závitníku na obr. 38 bylo zjištěno, že nejvíce opotřebené jsou tvářecí zuby z páté řady od počátku šroubovice. Menší poškození bylo pozorováno i na tvářecích zubech čtvrté a šesté řady (nejčastěji v podobě ztráty vrstvy povlaku).



Obr. 38 Poškození závitníku z měření 40 hm.% koncentrace N2 ve vodě.

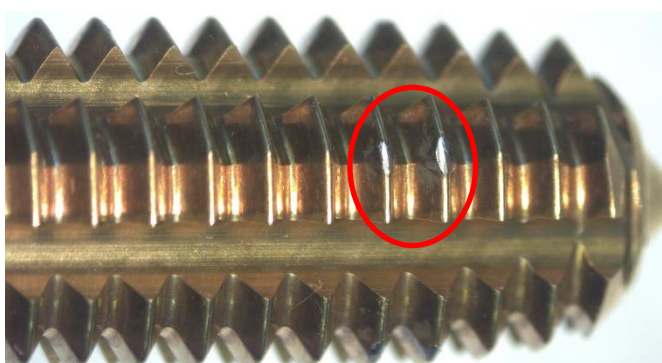
Pro detailní analýzu za pomoci porovnání výšky deformovaného a nedeformovaného tvářecího zubu byl vybrán pátý zub z rozsahu podle červené elipsy na obr. 38.



Obr. 39 Objemové porovnání rozsahu poškození tvářecího zubu.

Po odečtení rozdílu mezi modrým a červeným tvářecím zubem na obr. 39b byla zjištěna hloubka opotřebení tvářecího zubu, která činila 80 μm . Obr. 39a byl použit pro znázornění kolmého pohledu na míru opotřebení měřeného tvářecího zubu.

Kromě snímků z Alicony IF 5G byly pořízeny i snímky, za pomoci optického mikroskopu, a to přesně stejných dvou tvářecích zubů, které byly zobrazeny na obr. 38 pro porovnání rozdílného vykreslení (obr. 40a). Na obr. 40b byl zachycen detail, na základě kterého se pak ve snímku na Alicone IF 5G hledal zub použitý pro měření míry deformace tvářecího zubu.



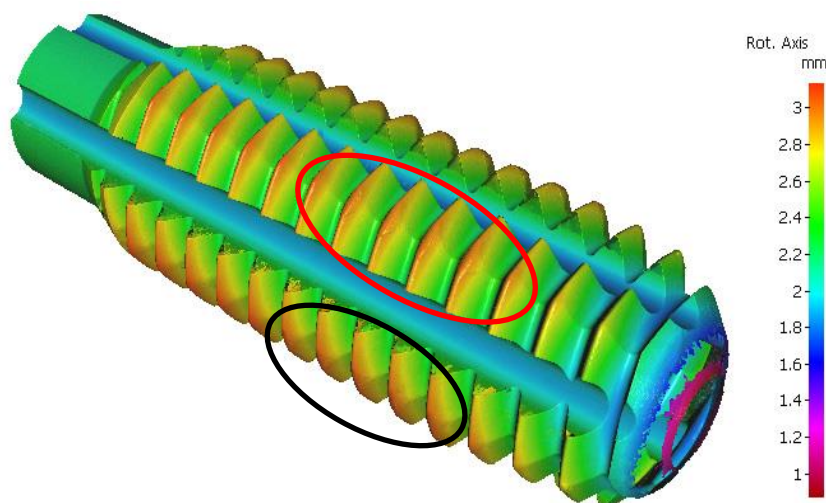
a)



b)

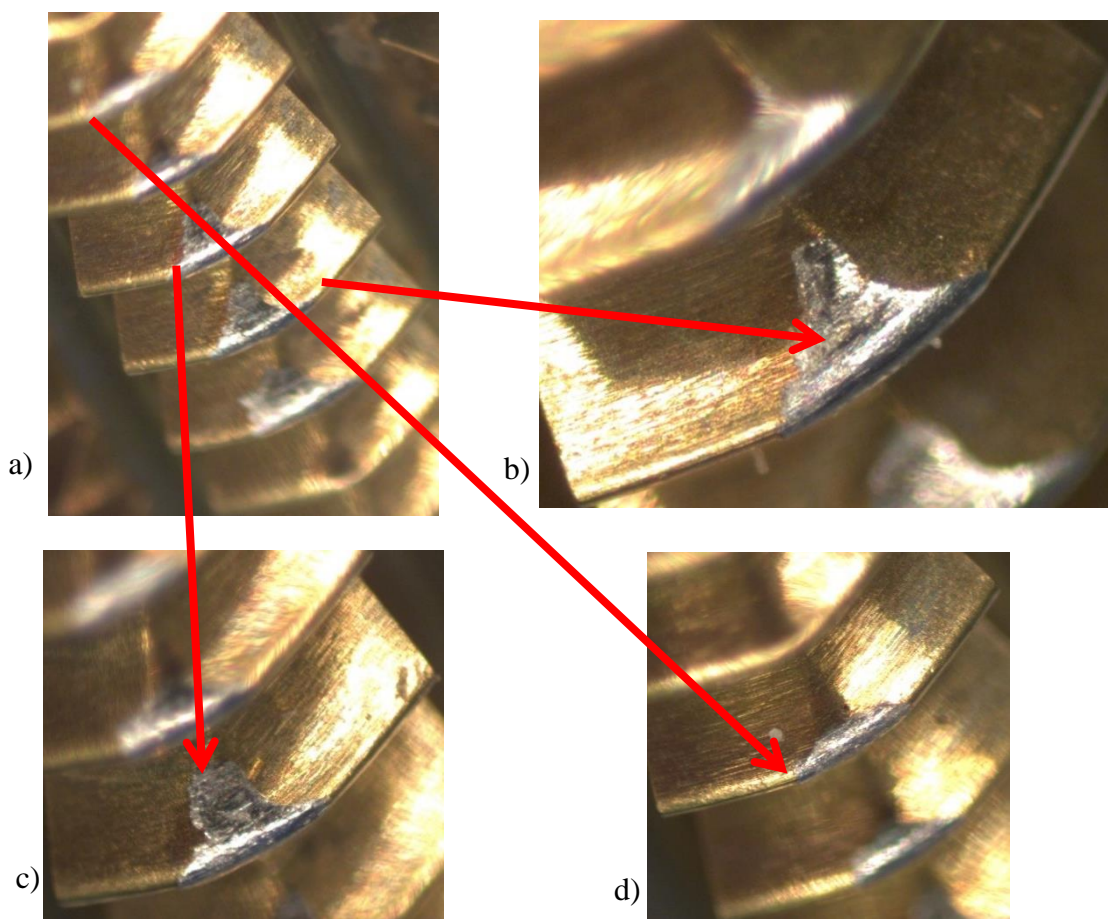
Obr. 40 Snímky tvářecích zubů z obr. 38, pořízené na optickém mikroskopu.

Poslední poškozený závitník z měření koncentrací kapaliny N₂ je na obr. 41. Zde byly poškozeny tvářecí zuby - od čtvrtého až po osmý tvářecí zub v řadě za sebou od počátku šroubovice. Přičemž čtvrté a osmé řady tvářecích zubů jeví jenom nepatrné poškození oproti ostatním řadám.



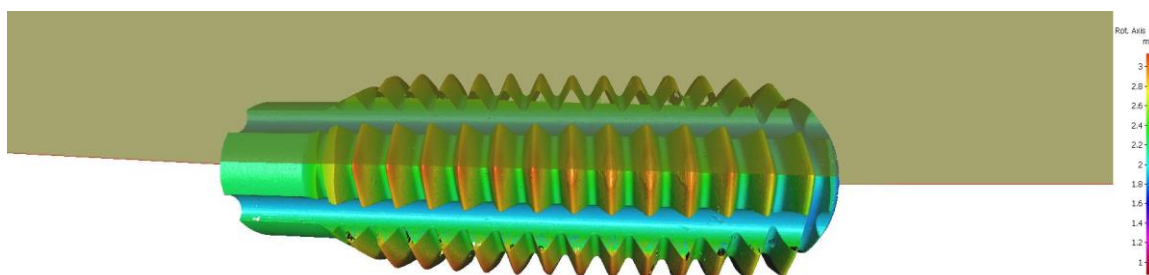
Obr. 41 Poškození závitníku z měření 25 hm.% koncentrace N₂ ve vodě.

Níže je uveden přehledový snímek (obr. 42a) poškození vyznačeného na obr. 41 červenou elipsou na optickém mikroskopu. Bylo zde viditelné poškození všech zubů. Některé z těchto zubů byly ještě detailněji vyfoceny na obr. 42b-d i tyto zuby jevíly jasné známky abraze a adheze

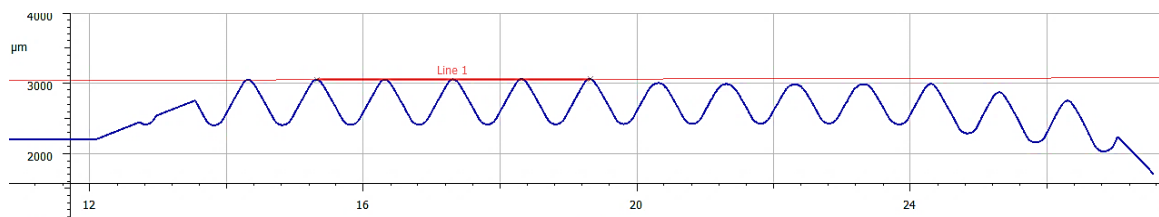


Obr. 42 Detailní poškození závitníku ze zkoušek s 25 hm.% koncentrací N₂.

Pro lepší představu, do jaké hloubky byly dané zuby poškozené v řadě za sebou, byl snímek z obr. 41 protnutý podélně rovinou (obr. 43). Na obr. 44 byla pak zobrazena tato rovina, na které je evidentní, do jaké hloubky jsou tvářecí zuby z obr. 42a deformované. Červená přímka byl proložena nepoškozenými zuby a vytváří tak pomyslnou hranici, které se měly dotýkat i vrcholy poničených tvářecích zubů (obr. 42a).



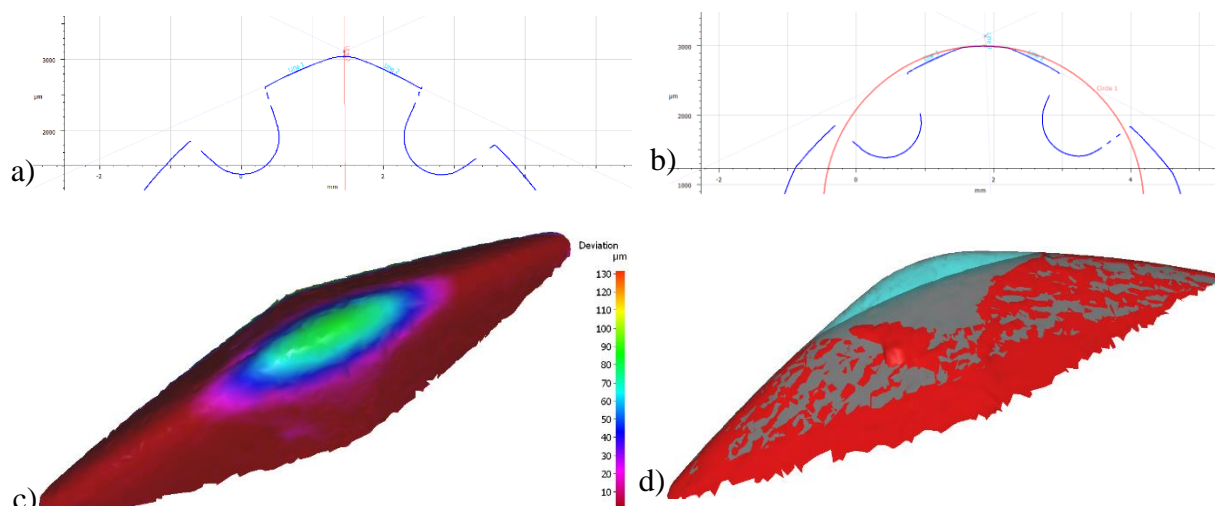
Obr. 43 Proložení roviny řezu tvářecím závitníkem z obr. 41.



Obr. 44 Podélný řez závitníkem rovinou z obr. 43.

Tvářecí zub z obr. 42b byl zvolen pro hodnocení jeho opotřebení. Toto hodnocení bylo provedeno dvojí metodou. Jednak za pomoci překrytí jednotlivých zubů (obr. 45c-d), jako to bylo provedeno ve všech ostatních měřeních, ale i porovnáním měření příčných průřezů ostrým a poškozeným tvářecím zubem. V druhém měření (obr. 45a) byla použita kolmá červená čára (*line 3*) pro změření velikosti vzdálenosti vrcholu nepoškozeného tvářecího zubu k průniku přímek proložených hřbetem zubu (*line 1* a *line 2*). Stejný postup byl zopakován i pro měření poškozeného tvářecího zubu (obr. 45b). Pro odměření obou vzdáleností byly tyto vzdálenosti od sebe odečteny, a tím bylo získáno výsledné opotřebení tvářecího zubu. Opotřebovaným tvářecím zubem byla ještě proložena kružnice pro zjištění poloměru zaoblení tvářecího zubu.

Postup, který byl popsán obr. 45a-b, je druhým typem měření, které bylo provedeno pro kontrolu správnosti prvního způsobu měření, ale i hloubkou opotřebení tvářecích zubů. V obou případech měření vycházela hloubka poškození tvářecího zubu shodně 95 μm , z tohoto důvodu bylo voleno dále jenom měření na základě první metody, a to pro jeho názornost. Poloměr zaoblení byl pro nepoškozený tvářecí zub vyčíslen na 68,75 μm (obr. 45a) a pro poškozený tvářecí zub na 142,24 μm (obr. 45b).



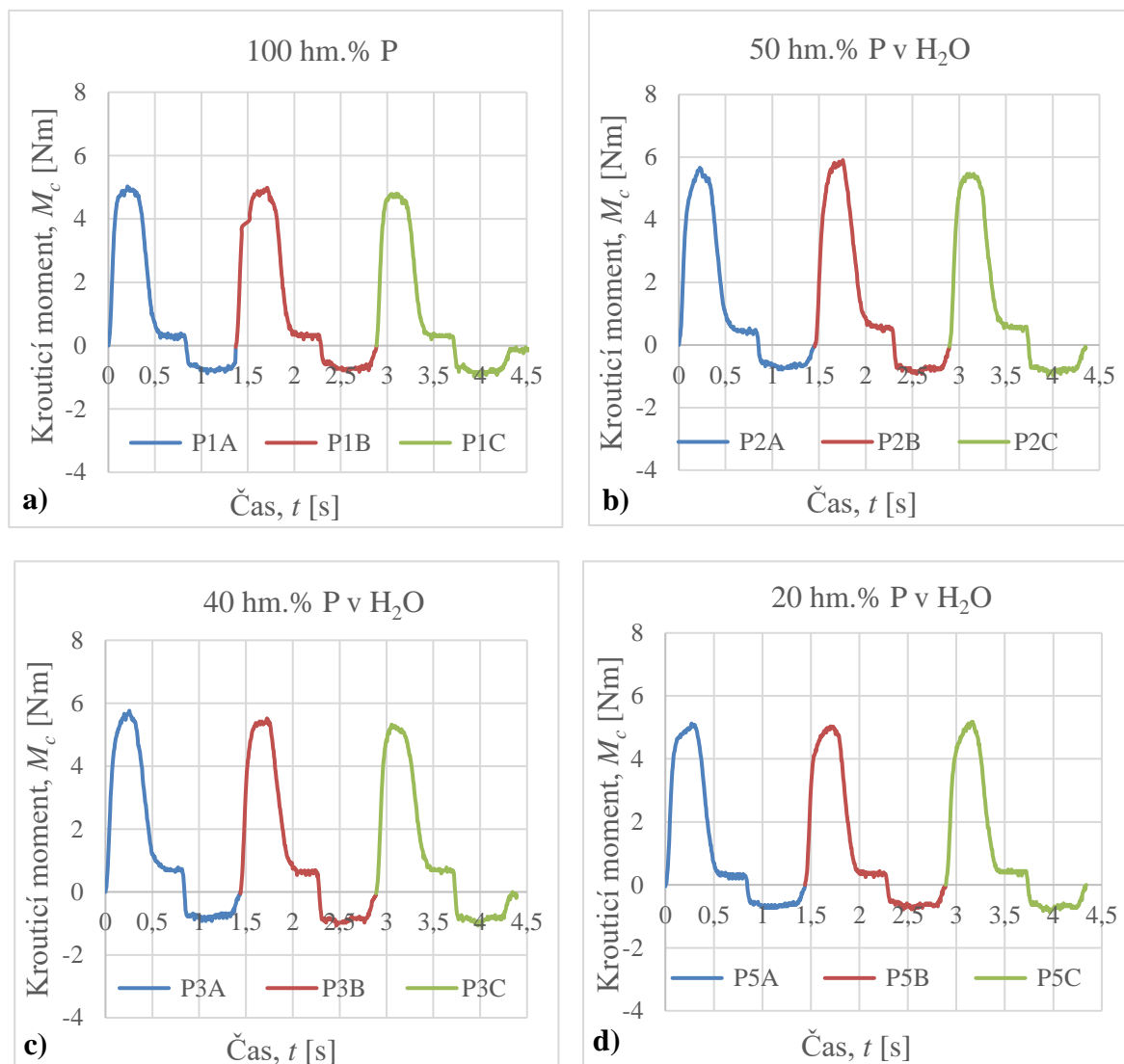
Obr. 45 Měření rozsahu poškození tvářecího zubu z obr. 42b.

4.2.4 Snímky povrchových struktur závitů

Snímky povrchových struktur závitů byly kvůli jejich rozsáhlosti umístěny do přílohy (Příloha 5).

4.3 Testování kapaliny P

4.3.1 Grafy momentových průběhů



Obr. 46 Grafy průběhů krutících momentů testovaných koncentrací kapaliny P ve vodě.

Poslední testovanou kapalinou byla polymerní kapalina (**P**). Koncentrát byl silně viskózní (jako med), jemně nažloutlé barvy a jevil tendenci k ulpívání na povrchu nástroje a obrobku. Měření s koncentrovanou kapalinou P bylo zaznamenáno do grafu na obr. 46a, kde bylo zajímavé pozorovat až kam účinkem mazacích vlastností kapaliny P klesal kruticí moment. Hodnoty M_{cx} nabývaly hodnot kolem 1 Nm, takto výrazný pokles nebyl zatím naměřen ani v jednom z doposud provedených měření. Rozdíl v hodnotách krutících momentů mezi M_{ch} a M_{cx} byl kolem 4 Nm.

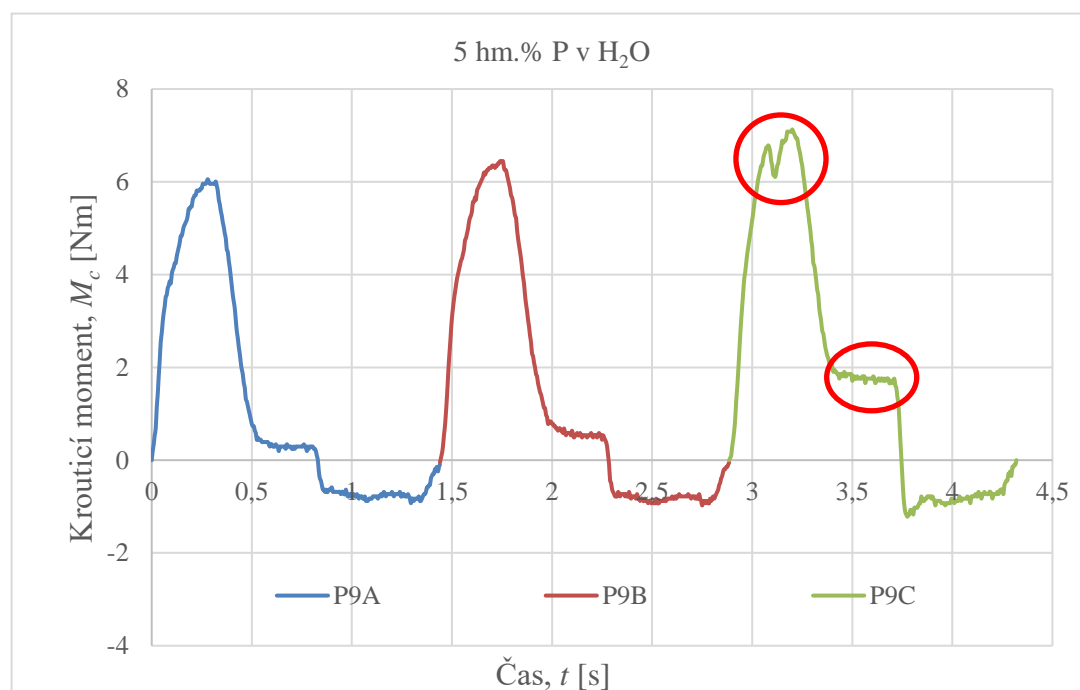
Vzhledem k tendenci koncentrované kapaliny P k ulpívání, byla další testovanou koncentrací její 50 hm.% směs s vodou (obr. 46b). Ulpívání kapaliny bylo tímto zředěním odstraněno, taktéž se dosáhlo výrazně nižší viskozity směsi. Hodnoty M_{ch} mírně stouply a dosahovaly spodní hranice 6 Nm. Poklesy M_{cx} se zvýšily a pohybovaly se kolem hodnoty

1 Nm, ale jejich rozdíl se stále pohyboval kolem 4 Nm. Zředěním kapaliny P s vodou 1:1 se sice zamezilo nežádoucím účinkům koncentrované kapaliny, ale naměřené výsledky stále nebyly uspokojivé.

Proto následovalo měření s koncentrací 40 hm.% kapaliny P ve vodě (obr. 46c). Zde byly naměřeny obdobné výsledky jako v předcházejícím měření bez průkazných zlepšení.

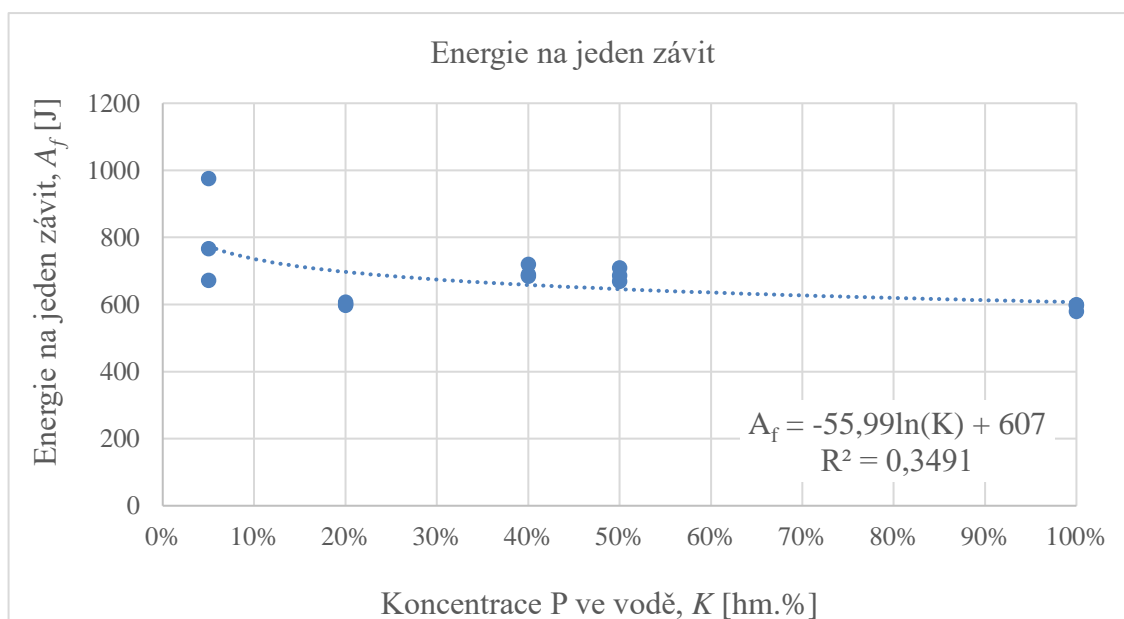
Ke zlepšení výsledků došlo až při snížení koncentrace kapaliny P o dalších 20 hm.% na 20 hm.% směs. V tomto případě byly naměřené téměř konstantní průběhy s hodnotami M_{ch} kolem 5 Nm, hodnoty M_{cx} klesly pod 1 Nm, čímž bylo dosaženo největšího rozdílu hodnot M_{ch} a M_{cx} v rozmezí 4,5-5,0 Nm. Všechna měření na obr. 46d) se vyznačovala stabilními průběhy s podobnými naměřenými hodnotami M_{ch} , M_{cx} , M_d a M_{dx} . Podrobný přehled všech dosažených hodnot M_{ch} , M_{cx} , M_d a M_{dx} z jednotlivých měření se nachází v příloze 3. Zde je možné porovnat jednotlivé sloupcové grafy hodnot M_{ch} , M_{cx} , M_d a M_{dx} spolu s odchylkami všech provedených měření.

Protože při snížení koncentrace kapaliny P ve vodě na 10 hm.% směs nebyly pozorovány zásadní změny grafických průběhů krouticích momentů oproti předchozímu měření, byla další měřenou koncentrací až 5 hm.% koncentrace kapaliny P ve vodě. Tato koncentrace byla taktéž poslední měřenou koncentrací, protože se zde dospělo k hranici mazacích vlastností kapaliny P. Již v prvním měření, které je zobrazeno v grafu na obr. 47, se dosahovalo (na rozdíl od všech ostatních měření kapaliny P) hodnot 6 Nm. Každým dalším měřením tato hodnota stoupala. V průběhu měření P9B byl zaznamenán nepatrný skřípavý zvuk. V průběhu třetího (posledního) měření byl zřetelný skřípavý zvuk tření kovu o kov, čímž bylo detekováno poškození závitníku. Po jeho prozkoumání, zde byly viditelné makroskopické deformace. V grafu na obr. 47 pro třetí měření P9C jsou červeně označeny oblasti v průběhu krouticího momentu, které byly indikátorem tváření závitu poškozenými tvářecími zuby.

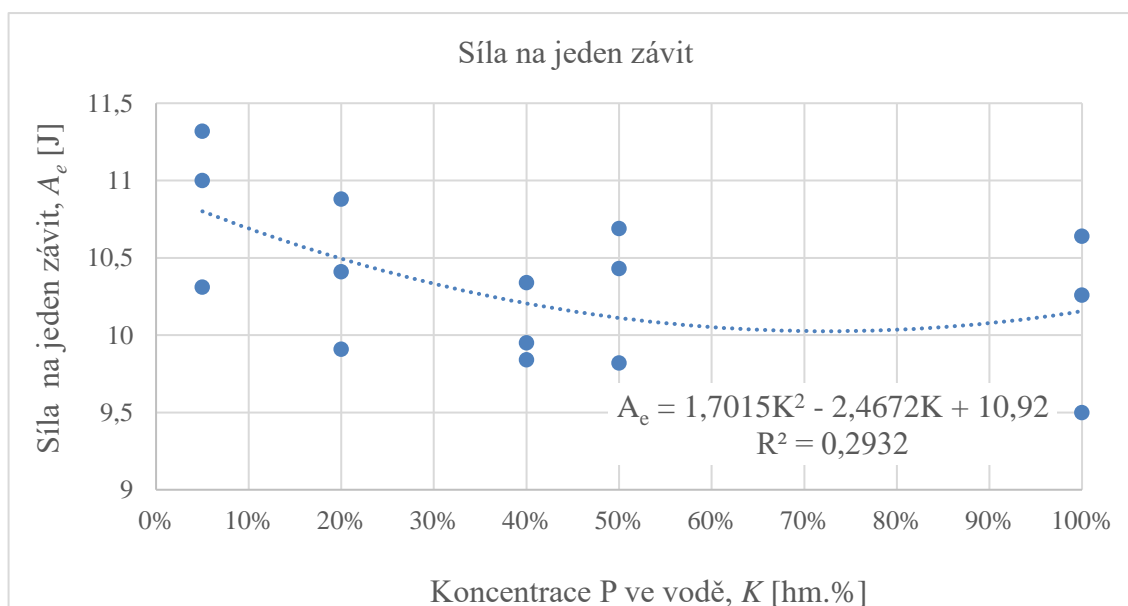


Obr. 47 Poslední měřená koncentrace kapaliny P ve vodě.

4.3.2 Energetická náročnost tvářecího procesu na výrobu jednoho závitu



Obr. 48 Energetické náročnosti vytvoření závitů (podíl krouticího momentu).

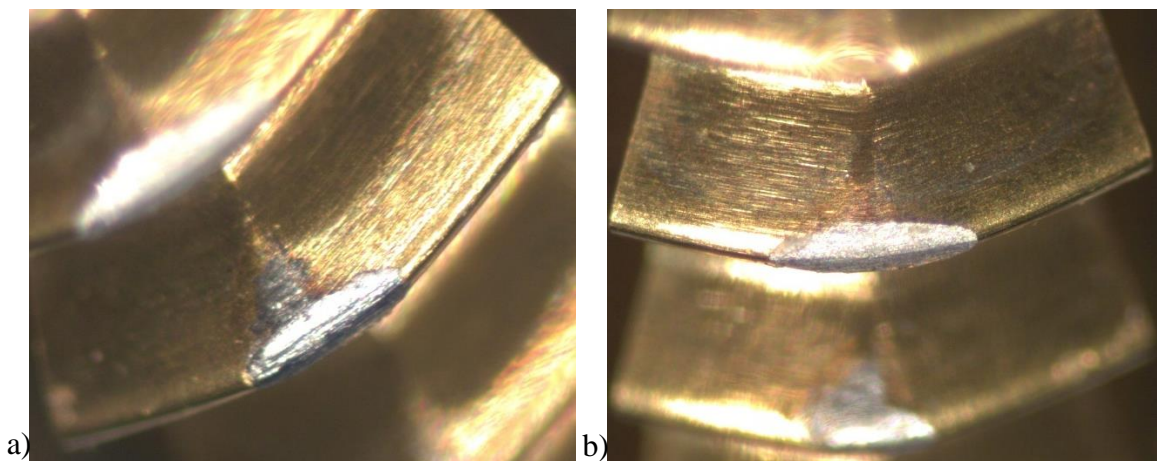


Obr. 49 Energetické náročnosti vytvoření závitů (podíl posuvové síly).

Oba výše uvedené grafy energetických náročností byly (obr. 48 a obr. 49) mírně zkresleny posledním měřením P9C, kdy z důvodu použití již poškozeného závitníku prudce vzrostly momenty i síly v porovnání s ostatním měřením. Po srovnání grafických průběhů s těmito energetickými grafy, se jako nejlepší koncentrace pro praxi doporučily 20-40 hm.% kapaliny P ve vodě.

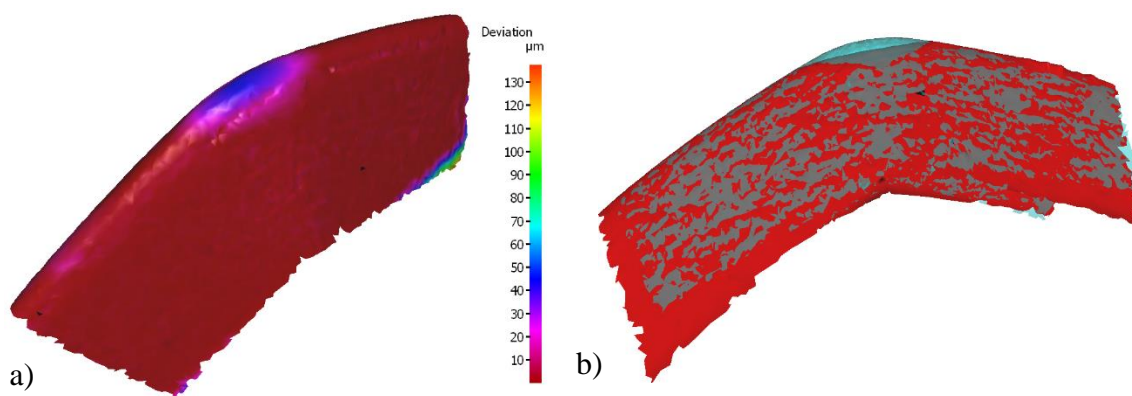
4.3.3 Poškození tvářecích závitníků

Závitník z posledního měření byl precizně očištěn, poté až došlo k jeho snímkování, a to na optickém mikroskopu pro zjištění celkového poškození na jednotlivých tvářecích zubech (obr. 50a-b). Bylo detekováno abrazivní a adhezivní poškození tvářecích zubů v páté a šesté řadě za sebou jdoucích zubů počítáno od začátku šroubovice.



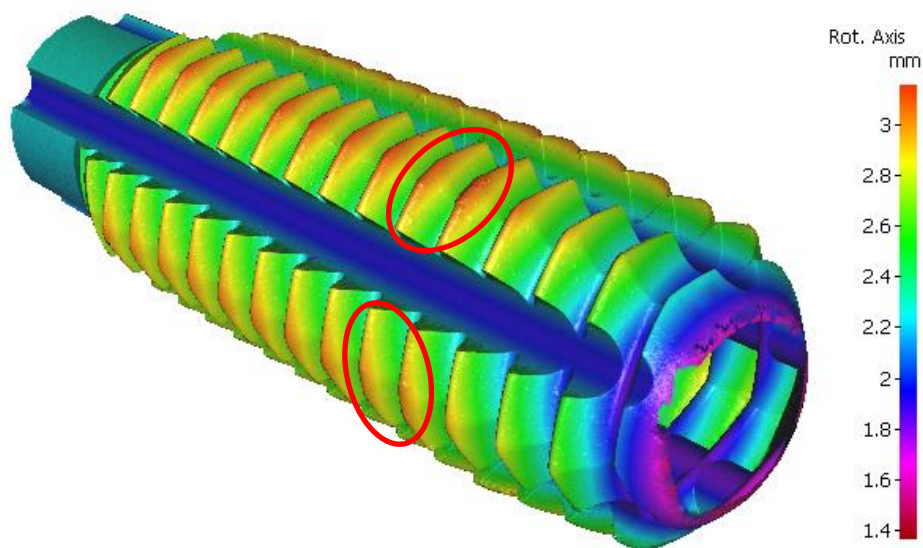
Obr. 50 Poškození závitníku z měření s 5 hm.% koncentrací kapaliny P ve vodě.

Na obr. 50a byl poškozený pátý tvářecí zub, který byl použit pro zjištění hloubky poškození porovnáním snímků poškozeného a nepoškozeného tvářecího zubu na obr. 51b. Obr. 51a byl použit pro zobrazení míry deformace, neboli odlišnosti povrchu poškozeného tvářecího zubu, v barevném spektru, kde každá barva znamená jinou míru rozdílu v povrchu poškozeného a nepoškozeného tvářecího zubu. Minimální rozdíl byl značen rudou barvou a pro jeho maximální hodnotu bylo využito barvy oranžové až světle červené.



Obr. 51 Objemové porovnání poškozeného a nepoškozeného tvářecího zubu.

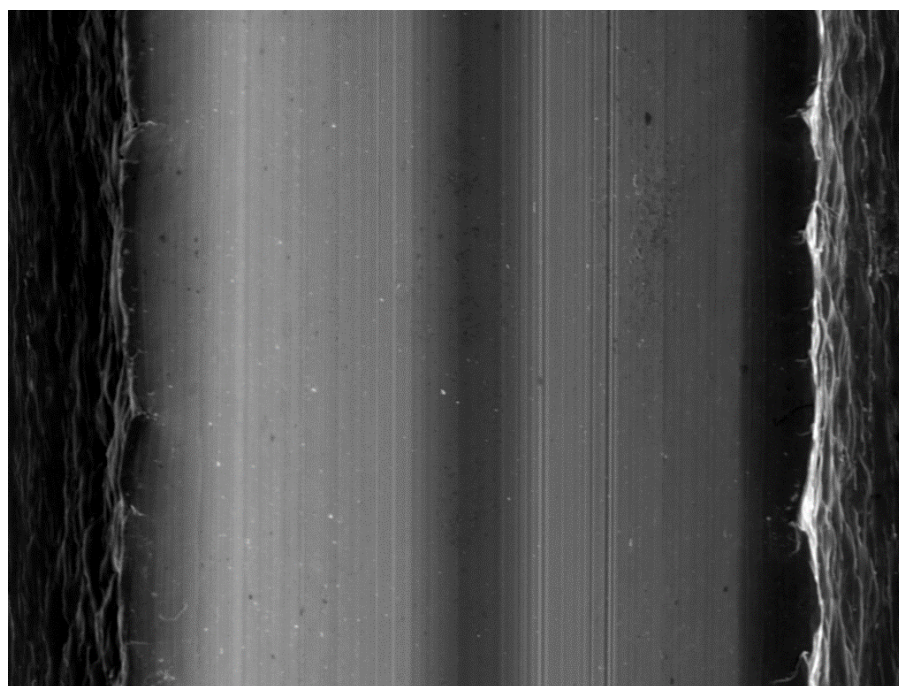
Z barevné škály vedle obr. 51a byl odečten rozdíl 50 μm mezi vrcholem nepoškozeného a poškozeným tvářecím zubem. Toto je nejmenší hodnota rozdílu mezi poškozeným a nepoškozeným tvářecím zubem, jaká byla naměřena, což znamená, že poškození tvářecích zubů v tomto případě nebylo až tak závažné, jakým se jevílo podle výsledků z měření P9C. Na obr. 52 níže je nasnímaný celý závitník i s poškozenými tvářecími zuby, které jsou vyznačené červenou elipsou.



Obr. 52 Snímek poškozeného tvářecího závitníku z měření s 5 hm.% koncentrací kapaliny P ve vodě.

4.3.4 Snímky povrchových struktur závitů

V této kapitole bylo uvedeno několik charakteristických snímků pro danou kapalinu a její koncentrace. Na obr. 53 je uveden snímek závitu z měření s koncentrovanou kapalinou P. Nebyly na něm detekovány žádná závažná poškození, vyznačoval se hladkou strukturou bez vad.



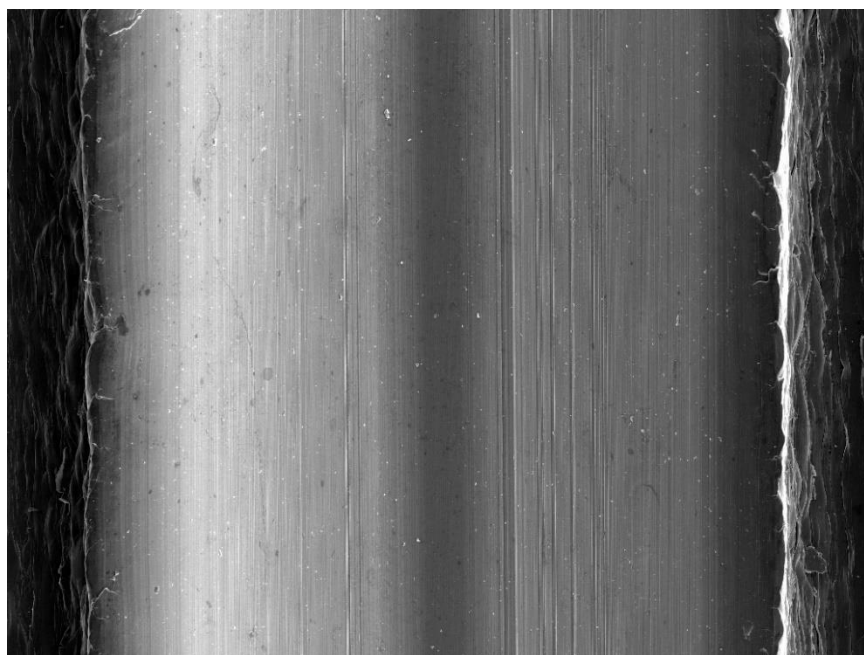
View field: 1.07 mm
WD: 44.1616 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan

Obr. 53 Snímek závitu z měření (100 % P).



Obr. 54 Snímek závitu z měření s 50 hm.% koncentrací kapaliny P ve vodě.

Obr. 54 znázorňuje snímek druhého testovaného závitu. I zde byl detekován poměrně hladký povrch s jemnými nerovnostmi po okrajích tvářené části závitu.

Ostatní snímky byly zařazeny do příloh (Příloha 6) pro jejich rychlejší a jednodušší porovnání s dalšími snímky z ostatních měření.

5 DISKUSE

Jedním z hlavních cílů této práce bylo najít charakteristické chování daných kapalin v průběhu samotného procesu a na tomto základě je doporučit pro další praxi. K vyhodnocování chladicích a mazacích účinků testovaných kapalin nebyla použita referenční kapalina, jak je to doporučeno v normě ASTM D5119, protože cílem bylo porovnat mazací a chladicí účinky mezi sebou a vybrat z nich tu nejvhodnější koncentraci pro praxi. Ve většině případů k srovnání účinků mazacích vlastností daných koncentrací sloužily předcházející měření, která byla porovnávána mezi sebou. Až zde bylo zahrnuto celkové porovnání dosažených výsledků, jejich doporučení pro další praxi spolu s návrhy, jak by ještě bylo možné dané měření zlepšit.

Vzhledem k tomu, že některá měření nabývala podobných výsledků, byla nejprve shrnuta zjištění, která jsou spíše doporučením pro další použití všech testovaných kapalin. Ani jednu z testovaných kapalin nelze doporučit pro mazání v jejich stoprocentních koncentracích. Tyto koncentrace, z důvodu pravděpodobného vzniku agregací, nebyly schopny naplno rozvinout svůj mazací a chladicí potenciál. Projevovaly tendence k ulpívání na nástrojích, obrobcích, v pracovním prostoru. Při použití koncentrovaných N1, N2 a P kapalin by mohlo dojít k zanesení automatického chladicího systému, nebo k ucpaní trysek. Pokud by byly jednotlivé kapaliny míseny s vodou, tak je zapotřebí dát pozor, aby se vždy vlévala mazací kapalina do vody, nikdy ne naopak. Pokud by byly směsi s vodou nalévány do chladicích van a zásobníků na chladicí kapaliny, musely by dané zásobníky chladicí kapaliny být vybaveny zařízením, které bude dané kapaliny pravidelně promíchávat, aby nedošlo k usazování zejména nanoaditivních částic.

Ze zkušebních měření s testovanými kapalinami bylo zřejmé, že existují optimální hodnoty hmotnostních koncentrací s vodou, kdy vykazují tyto kapaliny nejlepší výkon. Pokud daná testovaná kapalina byla příliš zředěná, pak nebylo možné vytvořenou testovanou kapalinu proudící v drážkách závitníku rovnoměrně a průběžně distribuovat do všech kontaktních míst, a tím docházelo k vzniku míst bez testované kapaliny. V těchto místech bylo dosaženo čistého kontaktu závitníku s materiálem, čímž se dospělo k vysokým hodnotám tření, které měly za následek skřípavý zvuk tření kovu o kov. Vysoké hodnoty tření v místech dotyku byly příčinou vzniku adhezního a abrazního opotřebení tvářecích zubů závitníku. Z analýz poškození závitníku bylo evidentní poškození nejprve pátého tvářecího zubu v pořadí za sebou jdoucích tvářecích zubů od počátku šroubovice. Až následně byl poškozen šestý tvářecí zub, který na sebe převzal funkci poškozeného pátého tvářecího zubu. V případech, kdy bylo dosaženo rozsáhlejšího poškození, byly postupně analyzovány i tvářecí zuby v sedmých, osmých, nebo dalších řadách. Toto masivní poškození mělo za následek nevyhovující tvářecí podmínky způsobené nedostačujícím mazáním a chlazením ze strany testovaných kapalin. V případech vzniku poškození při testování kapalin P a N1, bylo toto poškození způsobeno dosažením hranic tribologických vlastností těchto kapalin.

Testovaná kapalina číslo jedna - N1 - vykazovala poměrně dobré mazací účinky už od počátku měření zejména při nižších koncentracích kapaliny N1 ve vodě. Jeden závit byl vytvářen při použití kapaliny N1 na mazání za 1,6-1,8 s. Ze všech měření, která byla provedena bylo jenom s touto kapalinou dosaženo měření i při 4 hm.% koncentraci ve vodě. Kapalina N1 ve vyšších koncentracích (100-40 hm.%) dosahovala M_{ch} kolem 5 Nm, při nižších koncentracích (30-5 hm.%) byl zaznamenán pokles M_{ch} na hodnoty pod 4 Nm.

Poklesy M_{cx} od 40 hm.% koncentrace kapaliny N1 ve vodě ležely v pásmu hodnot 1- 2 Nm. Při bližším prozkoumání energetických náročností na proces tváření závitu spolu s výše uvedenými fakty byla N1 kapalina doporučena pro průmyslnou praxi v 10-30 hm.% koncentracích ve vodě, kdy vykazovala nejlepší účinky pro danou technologii.

V případě kapaliny N2 nebylo ukončeno ani jedno měření pro jakoukoliv koncentraci bez poničení závitníku. Mohlo to být způsobeno vysokou hustotou samotné směsi, která byla nejvyšší ze všech testovaných kapalin a to $1,183 \text{ g/cm}^3$ při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Měření pro koncentrovanou kapalinu N2 bylo typickým příkladem toho, co se stane, když se zvolí nevhodná procesní kapalina pro danou operaci. Celkové výsledky z měření s kapalinou N2 poukazovaly na velký potenciál v mazání a chlazení této kapaliny (rozdíly naměřené mezi hodnotami M_{ch} a M_{cx} byly větší než u měření s kapalinou N1), ale ne pro teplotně namáhavé průmyslové operace, kde dochází k tváření za studena. Pokud by se měla kapalina N2 dále testovat jinými testovacími metodami, pak by bylo doporučeno testování ve směších o koncentracích od 65 hm.% do 70 hm.%. V rozmezí těchto koncentrací byly naměřeny nejlepší výsledky pro zkoušky s kapalinou N2. Na základě dohody s firmou, ale i podle doporučení uvedených ve vědeckých publikacích, které byly zmíněné v teorii, byla pro ředění použita destilovaná voda. Na druhou stranu je možné, že dané procesní kapalině nevyhovoval zpracovávaný materiál a v případě tváření závitu do jiného materiálu by bylo dosaženo výrazně lepších vlastností.

Polymerní kapalina byla srovnávána s výsledky z testů kapaliny N1, protože výsledky zkoušek s kapalinou N2 nedopadly dle očekávání. V koncentrovaném stavu měla kapalina P vyšší hodnoty M_{ch} , než kapalina N1, ale výroba jednoho závitu trvala kratší časový úsek než u kapaliny N1. Na druhou stranu hodnoty poklesů M_{cx} již od prvního měření byly prokazatelně nižší než u měření s N1. V dalších měřeních byly i nadále o něco málo vyšší hodnoty M_{ch} u kapaliny P v porovnání s totožnými měřeními s kapalinou N1. Kapalina P dosahovala výraznějších rozdílů hodnot M_{ch} a M_{cx} . U kapaliny N1 byly jednotlivé grafické průběhy krouticích momentů s nižšími hodnotami gradientů, než u kapaliny P. Kapalina P dosáhla minimální hmotnostní koncentrace látky ve vodě o jedno procento vyšší, než tomu bylo v případě kapaliny N1, čímž prokázala, že má nižší účinky ve směších, kde je víc než 94 hm% vody. Z energetických výpočtů a následně sestrojených grafů v kombinaci s doposud zjištěnými vlastnostmi kapaliny P byly doporučeny koncentrace kapaliny P ve vodě v rozmezí 20-40 hm.%. Při porovnání snímků vnitřních struktur závitů z testů s kapalinou P bylo dosaženo patrně hladších povrchů s menšími nedokonalostmi, než tomu bylo u kapaliny N1. Po vyhodnocení všech dosavadních zkoušek byla vyhodnocena kapalina P z trilogického hlediska jako o něco málo lepší pro tuto technologii než kapalina N1.

Zkouškami N1, P i N2 kapalin byla prokázána redukční vlastnost nanoaditiv na bázi uhlíku a polymerů, která má účinek na snížení krouticích momentů v průběhu procesu tváření závitu i v reverzním chodu závitníku. Dochází zde ke snižování tření mezi nástrojem a obrobkem, taktéž k menšímu opotřebení v případech, kdy dané kapaliny plní svou funkci.

Pro detailnější přehled o vlastnostech testovaných kapalin by bylo vhodné dokončit trvanlivostní zkoušky pro danou hmotnostní koncentraci testované kapaliny, aniž by došlo k poškození závitníku. Samotné tvářecí závitníky při technologicky správném mazání vydrží řádově tisíce závitů, než se zcela opotřebí. Dalším doporučeným typem zkoušky by bylo zkoumání vlastností vybraných hmotnostních koncentrací N1 a P při zásadních změnách teplot procesu, kterých by se docílilo zahrátím dané kapaliny na požadovanou hodnotu

a následným testováním při těchto teplotách. Dále by bylo vhodné provést zkoušky s použitím jiné ředicí složky, než je destilovaná voda a další tribologické zkoušky. Po jejich realizaci by bylo možné na základě zjištěných výsledků navrhnout optimální vlastnosti procesní kapaliny pro daný proces.

ZÁVĚR

Výběr vhodné procesní kapaliny pomáhá k úspoře nákladů na řezné či tvářecí nástroje. Proto je velmi důležité nejen nalezení vhodné kapaliny, ale i její koncentrační aplikace.

Z řešení diplomové práce byly učiněny tyto závěry:

- mazací kapaliny mají značný účinek na proces tváření závitů,
- pokud je zvolena nesprávná koncentrace nebo druh kapaliny, mohou se dostavit negativní důsledky na výsledný proces tváření závitu,
- pro celkové vyhodnocení tribologických účinků testovaných kapalin je potřebné zohlednit i grafické průběhy krouticích momentů, energetickou náročnost celého procesu tváření závitu, výslednou strukturu závitu i závitníku,
- ani jednu v diplomové práci testovaných kapalin nelze použít pro dané technologie v 100 % koncentracích,
- nedoporučuje se použití hmotnostních koncentrací testovaných kapalin pod 6 hm.%,
- ve všech případech bylo dosaženo poklesu krouticích momentů v průběhu záběru tvářecího nástroje, tzn. testované kapaliny vykazovaly mazací účinky při tváření závitů,
- pokud dojde k poškození daného typu závitníku, pak se abrazivní a adhezivní opotřebení začne šířit, a to obvykle od pátého tvářecího zubu v řadě za sebou na šroubovici,
- k tváření závitů v daném materiálu se nedoporučuje používat kapalinu N2,
- optimálního účinku při ředění kapaliny N1 vodou bylo dosaženo v rozmezí 10- 20 hm.% koncentrace,
- pro kapalinu P se optimální rozmezí pohybovalo od 20 hm.% do 40 hm.%.

Po zvážení všech dosavadních výsledků z průběhů testů byla pro danou společnost zvolena kapalina P jako kapalina nejlépe vyhovující podmínkám každodenního provozu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOBEŠ, Petr. Současné trendy v *oblasti kapalin* pro obrábění. MM Průmyslové spektrum: Nové technologie a stroje v *třískovém obrábění* [online]. 2007, 2007(5) [cit. 2021-03-24]. ISSN 70521. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-v-oblasti-kapalin-pro-obrabeni>
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] SINGH, Rabesh, Amit DIXIT, Amitava MANDAL a Anuj SHARMA. Emerging application of nanoparticle-enriched cutting fluid in metal removal processes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, 39(11), 4677-4717 [cit. 2021-04-11]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-017-0839-0
- [4] DRESEL, Dr. a Theo MANG PROFESOR. Lubricants and Lubrication. 2. vyd. Weinheim: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. ISBN 978-3-527-64556-5.
- [5] Chladicí maziva mísitelná s vodou. Blaser: SWISSLUBE [online]. Blaser Swissslube CZ, s.r.o., Jihlavská 2, 664 41 Troubsko: Blaser Swissslube 2021, 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.blaser.com/cs_CZ/obrabeni-kovu/our-solutions/water-miscible-coolants
- [6] KREJČÍK, Luboš a Jiří PSCHERA. Kapaliny pro obrábění. MM Průmyslové spektrum [online]. 2011, 2011(78) [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni>
- [7] RŮŽIČKA, Pavel. Požadavky na obráběcí kapaliny z hlediska typů obráběcích operací, materiálů a provozních podmínek. *Tribotechnika* [online]. TechPark, o.z., 2019, 2019(4) [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/pozadavky-na-obrabeci-kapaliny-z-hlediska-typu-obrabecich-operaci-materialu-a-provoznich-podminek.html>
- [8] PADMADEVI, Chellapa. Nanoemulsion and Nanoemulgel as a Topical Formulation. *Iosrphr* [online]. 2015, 10(5), 43-47 [cit. 2021-03-28]. ISSN 2319-4219. Dostupné z: <http://iosrphr.org/papers/v5i10/F0510043047.pdf>
- [9] KŘÍŽ, Petr. Moderní trendy ve vývoji obráběcích kapalin. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005, 2005(5) [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-trendy-ve-vyvoji-obrabecich-kapalin>
- [10] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [11] Syntetické obráběcí kapaliny pro budoucnost. *Tribotechnika* [online]. 2011, 2011(11) [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32011/synteticke-obrabeci-kapaliny-pro-budoucnost.html>
- [12] Fluid management syntetických obráběcích kapalin. *Tribotechnika* [online]. 2012, 2012(6) [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/-fluid-management-syntetickych-obrabecich-kapalin.html>
- [13] ČILLÍKOVÁ, M. Top trendy v obrábění: VI. část - procesné médiá (příručka). Žilina: MEDIA/ST, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-969789-3-9.

- [14] HRABEC, Ladislav, ed. Tribotechnika v provozu a údržbě 2011: kniha přednášek mezinárodní konference 2011. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2504-5.
- [15] JERSÁK, Jan a Alexey POPOV. Ekologické obráběcí kapaliny nové generace. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-142-9.
- [16] Flowdrill. Flowdrill: What is Flowdrill. [online]. United States, 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: https://www.flowdrill.com/eu_en/
- [17] EUCUT 00EP: vysoce kvalitní emulze pro tváření kovů. Technická lepidla [online]. Dobroměřice: FALCON CZECH s.r.o., 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.technikalepidla.cz/images/15-emulze/15.TL-EUCUT-00EP.pdf>
- [18] LUBRODAL F 70 M-40 LV. FUCHS: Lubricants, technology, people [online]. Praha: FUCHS 2021, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/cz/cs/produkt/product/71167-lubrodal-f-70-m-40-lv/>
- [19] LUBRODAL FC 331. FUCHS: Lubricants, technology, people [online]. Praha: FUCHS 2021, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/cz/cs/produkt/product/71171-lubrodal-fc-331/>
- [20] LUBRODAL KB 10 conc. FUCHS: Lubricants, technology, people [online]. Praha: FUCHS 2021, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/cz/cs/produkt/product/71175-lubrodal-kb-10-conc/>
- [21] Mobil Evaporative Fluid 2002: Odpařitelná tvářecí kapalina. LubStar: The oil company [online]. Bratislava: LUBSTAR, a.s. 2008–2021, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.lubstar.cz/upload/files/cs/evaporative-fluid-2002.pdf>
- [22] LUBRODAL ST 500 V. FUCHS: Lubricants, technology, people [online]. Praha: FUCHS 2021, 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/cz/cs/produkt/product/71181-lubrodal-st-500-v/>
- [23] KOPECKÝ, Leoš. Aditiva s nanočásticemi a vlastnosti procesních kapalin. MM Průmyslové spektrum. MM Science Journal, 2020, 2020(10), 70-71. ISSN 1212-2572.
- [24] Study of Properties of Nanostructures and Metal Nanocomposites on Their Basis. Nanomechanics and Micromechanics: Generalized Models and Nonclassical Engineering Approaches [online]. Boca Raton: Apple Academic Press, 2020, s. 26 [cit. 2021-04-05]. ISBN 9780429322440. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429322440-2/study-properties-nanostructures-metal-nanocomposites-basis-yu-fedotov-alexander-vakhrushev?context=ubx&refId=fdc7e3e8-ca2d-4a1a-8406-878853729d3d>
- [25] GEORGAKILAS, V, M OTYEPKA, Ab BOURLINOS et al. Functionalization of Graphene: Covalent and Non-Covalent Approaches, Derivatives and Applications. Chemical Reviews [online]. AMER CHEMICAL SOC, 2012, 112(11), 6156-6214 [cit. 2021-04-05]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/cr3000412
- [26] ZHOU, K. (Ed.). Carbon Nanomaterials: Modeling, Design, and Applications [online]. Boca Raton: CRC Press, 2019 [cit. 2021-04-05]. ISBN 10.1201/9781351123587. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781351123587/carbon->

nanomaterials-kun-zhou?context=ubx&refId=d6d92ff8-d9d8-4b27-8b1a-7cccebec631f

- [27] MURA, A, H WANG, F ADAMO a J KONG. Graphene coatings to enhance tribological performance of steel. *Mechanics of advanced materials and structures* [online]. Taylor & Francis, 2021, 28(7), 657-664 [cit. 2021-04-05]. ISSN 1537-6494. Dostupné z: doi:10.1080/15376494.2019.1582825
- [28] SUN, Jianlin a Shaonan DU. Application of graphene derivatives and their nanocomposites in tribology and lubrication: a review. *RSC Advances* [online]. 2019, 9(69), 40642-40661 [cit. 2021-04-05]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/c9ra05679c
- [29] MURA, Andrea, Francesca CURÀ a Federica ADAMO. Evaluation of graphene grease compound as lubricant for spline couplings. *Tribology international* [online]. Elsevier Ltd, 2018, 117, 162-167 [cit. 2021-04-05]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2017.08.027
- [30] PÍŠKA, M, J SEDLÁČEK, V FOKSOVÁ a P SLIWKOVÁ. Tribological Performance of Graphene and Graphene *Oxide* Films as Solid Lubricant Layers on Tool Steel Surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. Galati: IOP Publishing, 2020, 968, 1-9 [cit. 2021-04-11]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/968/1/012028
- [31] KLEMENZ, Andreas, Lars PASTEWKA, S BALAKRISHNA, Arnaud CARON, Roland BENNEWITZ, Michael MOSELER a Andreas KLEMENZ. Atomic scale mechanisms of friction reduction and wear protection by graphene. *Nano letters* [online]. 2014, 14(12), 7145-7152 [cit. 2021-04-05]. ISSN 15306984. Dostupné z: doi:10.1021/nl5037403
- [32] MIRZAAMIRI, Rouhollah, Saleh AKBARZADEH, Saeed ZIAEI-RAD, Dong-gap SHIN a Dae-eun KIM. Molecular dynamics simulation and experimental investigation of tribological behavior of nanodiamonds in aqueous suspensions. *Tribology international* [online]. Elsevier Ltd, 2021, 156 [cit. 2021-04-13]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106838
- [33] KŘÍŽOVÁ, Olga. Nanomaziva v praxi. *Tribotechnické informace: maziva - oleje - technologické kapaliny* [online]. Česká strojnická společnost, odborná sekce Tribotechnika ve spolupráci s redakcí časopisu TechMagazín, Praha: Česká strojnická společnost, odborná sekce Tribotechnika ve spolupráci s redakcí časopisu TechMagazín, 2017, 2017(1), 47-48 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/tribotechnikaaa20171.pdf
- [34] HE, Daping, Kun CHENG, Tao PENG, Mu PAN a Shichun MU. Graphene/carbon nanospheres sandwich supported PEM fuel cell metal nanocatalysts with remarkably high activity and stability. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2013, 1(6), 2126-2132 [cit. 2021-04-05]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/c2ta00606e
- [35] NEUSTROEV, E., I. KURKINA, S. MAMAEVA a M. NOGOVITSYNA. Synthesis, Characterisation and Applications of Nanocomposites Based on Silver Nanoparticles and Graphene Oxide. *Journal of Structural Chemistry* [online]. Moscow: Pleiades Publishing, 2018, 59(4), 847-852 [cit. 2021-04-05]. ISSN 0022-4766. Dostupné z: doi:10.1134/S0022476618040145

- [36] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
- [37] AMRITA, M, S.A SHARIQ a Charan GOPAL. Experimental investigation on application of emulsifier oil based nano cutting fluids in metal cutting process. *Procedia engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2014, 97(), 115-124 [cit. 2021-04-11]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.12.231
- [38] MARITSA, Loukia, Alfredo BOL a Santiago APARICIO. Densification and tribofilm formation in hydrocarbon nanofluids induced by MoS₂ nanotubes. *Journal of molecular liquids* [online]. Elsevier B.V, 2020, 311 [cit. 2021-04-11]. ISSN 0167-7322. Dostupné z: doi:10.1016/j.molliq.2020.113291
- [39] ZHU, Yan, Toshimori SEKINE, Kieren BRIGATTI et al. Shock-wave resistance of WS₂ nanotubes. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2003, 125(5), 1329-1333 [cit. 2021-04-11]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja021208i
- [40] LAZIČ, D. Effect of if-ws₂ nanoparticles addition on physicalmechanical and rheological properties and on chemical resistance of polyurethane paint. OTEH 2016 Conference: Belgrad, 2016.
- [41] ZHU, Yan, Toshimori SEKINE, Yan LI et al. Shock-absorbing and failure mechanisms of WS₂ and MoS₂ nanoparticles with fullerene-like structures under shock wave pressure. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2005, 127(46), 16263 [cit. 2021-04-11]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja054715j
- [42] CHAN, Chung-hung, Sook Wah TANG, Noor Khairin MOHD, Wen Huei LIM, Shoot Kian YEONG a Zainab IDRIS. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier Ltd, 2018, 93, 145-157 [cit. 2021-04-20]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.05.024
- [43] MENG, Yonggang, Jun XU, Zhongmin JIN, Braham PRAKASH a Yuanzhong HU. A review of recent advances in tribology. *Friction* [online]. SpringerOpen, 2020, 8(2), 221-300 [cit. 2021-04-20]. ISSN 2223-7690. Dostupné z: doi:10.1007/s40544-020-0367-2
- [44] PAMIES, Ramón a José SANES. Graphene-Ionic Liquid Thin Film Nanolubricant. *Nanomaterials* [online]. Basel: MDPI AG, 2020, 10(3), 535 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: doi:10.3390/nano10030535
- [45] Diene Polymer. GOOCH, Jan. *Encyclopedic Dictionary of Polymers* [online]. New York, NY: Springer New York, 2011, s. 214-214 [cit. 2021-04-10]. ISBN 978-1-4419-6247-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-6247-8_3595
- [46] PAPAGEORGIOU, Dimitrios, Ian KINLOCH a Robert YOUNG. Hybrid multifunctional graphene/glass-fibre polypropylene composites. *Composites Science and Technology* [online]. Barking: Elsevier BV, 2016, 137, 44 [cit. 2021-04-10]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1921103144/>
- [47] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.

- [48] KOPELIOVICH, Dimitri. Tribology of polymers. SubsTech: Substance & Technologies [online]. tribology_of_polymers.txt, 2013 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tribology_of_polymers
- [49] BERNAT, S., A. BRINK, M. LUCAS a N. ESPALLARGAS. Tribological Behavior of Polymer *Seal* Materials in Water-Based Hydraulic Fluids. Journal of Tribology [online]. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018, 140(6) [cit. 2021-04-18]. ISSN 07424787. Dostupné z: doi:10.1115/1.4040078
- [50] TRYBENEKR, Ivan. Moderní polymerní kapaliny pro oblast obrábění. Tribotechnické informace: maziva - oleje - technologické *kapaliny* [online]. Praha: Tech media publishing s.r.o., 2018, 2018(1), 46-47 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/tribo/tribo_tm06_nahled51.pdf
- [51] TILTON, Robert D. Opportunities for complex fluids engineering with nanoparticulate polymer brushes. AIChE Journal [online]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2019, 65(1), 3-12 [cit. 2021-04-20]. ISSN 0001-1541. Dostupné z: doi:10.1002/aic.16427
- [52] VAN DER WEG, Karel J., Sissi DE BEER a Guido Cornelis RITSEMA VAN ECK. Polymer *Brush* Friction in Cylindrical Geometries. Lubricants [online]. 2019, 7(10), 2075-4442 [cit. 2021-04-20]. ISSN 2075-4442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants7100084
- [53] WEI, Qiangbing, Tian FU, Qinyu YUE, Huan LIU, Shuanhong MA, Meirong CAI a Feng *ZHOU*. Graphene oxide/brush-like polysaccharide copolymer nanohybrids as eco-friendly additives for water-based lubrication. Tribology international [online]. Elsevier Ltd, 2021, 157 [cit. 2021-04-20]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2021.106895
- [54] SHEN, Ming-xue, Zhao-xiang ZHANG, Jin-tao YANG, Guang-yao XIONG a Ming-xue SHEN. Wetting Behavior and Tribological Properties of Polymer Brushes on Laser-Textured Surface. Polymers [online]. 2019, 11(6) [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: doi:10.3390/polym11060981
- [55] MCKEEN LAURENCE W. Introduction to the Tribology of Fluorocoatings. Fluorinated Coatings and Finishes Handbook - The *Definitive* User's Guide. 2nd Edition. Elsevier, 2016, s. 1-1. ISBN 9780323371261. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpFCFHTD07/id:kt010SH8K1/fluorinated-coatings/introduction-tribology?kpromoter=Summon>
- [56] AKCHURIN, Aydar. Pin on disk test. In: Tribonet: about tribology [online]. U.S.: tribonet, 2016-2021 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
- [57] G02.40 WEAR AND EROSION (SPONSORING COMMITTEE). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Active Standard ASTM G99 [online]. 2010, 99(17), 1-6 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: doi:10.1520/G0099-05R10
- [58] FEDERICI, Matteo, Stefano GIALANELLA, Mara LEONARDI, Guido PERRICONE a Giovanni STRAFFELINI. A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials. Wear [online]. Elsevier B.V, 2018, 410-411, 202-209 [cit. 2021-04-25]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2018.07.011

- [59] Pinning Down the Pin-on Disk Tribometer. Koehler: instrument company, inc. [online]. U.S.: Koehler instrument company, inc., 2021 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://koehlerinstrument.com/pinning-down-the-pin-on-disk-tribometer/>
- [60] BĚLÍN, Lukáš. Aplikace vodou-mísitelných řezných kapalin [online]. TechPark, o.z., 2019, 2019(4) [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/aplikace-vodoumisitelných-reznych-kapalin-v-oblastech-s-vysokym-narokem-na-mazivostni-charakteristik.html>
- [61] PÍŠKA, Miroslav. Technologické zkoušky obráběcích a Tvářecích olejů. Tribotechnické informace: maziva - oleje - technologické *kapaliny* [online]. Tech media publishing s.r.o., 2018, 2018(2), 34-36 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/retro/tribo_tm10_2018.pdf
- [62] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I Technologie obrábění - 2. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. Brno: VUT, 2004 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [63] Výroba vnitřních závitů tvářením. MM Průmyslové spektrum [online]. PRaha: Vogel Publishing, 2001, 2001(4), 28 [cit. 2021-05-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-vnitrnich-zavitu-tvarenim>
- [64] PISKA, Miroslav a Petra SLIWKOVA. Surface Parameters, Tribological Tests and Cutting Performance of Coated HSS Taps. Procedia engineering [online]. Elsevier Ltd, 2015, 100(), 125-134 [cit. 2021-05-04]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.01.350
- [65] ČEP, RObert. Skripta Technologie II [online]. 2008. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [66] BAROOAH, Rohan Kumar, A.F.M ARIF, J.M PAIVA, Simon OOMEN-HURST a S.C VELDHUIS. Wear of form taps in threading of Al-Si alloy parts: Mechanisms and measurements. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2020, 442-443 [cit. 2021-05-05]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2019.203153
- [67] CHOWDHARY, Sameer, Richard E. DEVOR a Shiv G. KAPOOR. Modeling forces including elastic recovery for internal thread forming.(Author Abstract). *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2003, 125(4), 681 [cit. 2021-05-06]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.1619178
- [68] SEDLÁKOVÁ, Eva. Technologická a ekonomická analýza výroby součástí pro automobilový průmysl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019.
- [69] TLUSTÝ, Jiří. Manufacturing processes and equipment. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000, xxviii, 928 s. : il. ISBN 0-201-49865-0.
- [70] Standard Tests. FALEX: Tribology [online]. Wingepark 23b, B-3110 ROTSELAAR: Wingepark 23b, B-3110 ROTSELAAR [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://eu.falex.com/testing/standard-tests/>
- [71] BARTELS, Thorsten. Mechanical-Dynamic Test Methods for Lubricants. MANG, Theo a Wilfried DRESEL. Lubricants and Lubrication. 2nd. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017, s. 903-1053. ISBN 978-3-527-32670-9.

- [72] ASTM D5619-00(2011). Standard Test Method for Comparing Metal Removal Fluids Using the Tapping Torque Test *Machine*. Withdrawn 2016. West Conshohocken, PA, US: ASTM International, 2011.
- [73] KORHONEN, Hannu, Arto KOISTINEN a Reijo LAPPALAINEN. Improvements in the thread cutting torque for a 6082-T6 aluminum-based alloy with tapping tools utilizing diamond coating. *Machining science and technology* [online]. Taylor & Francis, 2018, 22(4), 696-728 [cit. 2021-05-01]. ISSN 1091-0344. Dostupné z: doi:10.1080/10910344.2017.1402930
- [74] LIU, Meng, Zesheng JI, Rui FAN, Xingguo WANG a Meng LIU. Finite Element Analysis of Extrusion Process for Magnesium Alloy Internal Threads with Electromagnetic Induction-Assisted Heating and Thread Performance Research. *Materials (Basel, Switzerland)* [online]. 2020, 13(9) [cit. 2021-04-29]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13092170
- [75] GRZESIK, Wit. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications. 2008. ISBN 9780080557496.
- [76] MANG, Theo, Carmen FREILER a Dietrich HÖRNER. Metalworking fluids. MANG, Theo a Wilfried DRESEL. *Lubricants and Lubrication*. 2nd. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017, s. 491-631. ISBN 978-3-527-32670-9.
- [77] 54SiCrV6. European Steel and Alloy Grades/Numbers SteelNumber [online]. National Technical University KhPI, 21 Frunze Str., *Kharkov*, 61002, UKRAINE: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database, 2011-2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=428
- [78] 3xD Ratio drills [online]. Deutsch: Gühring, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.guhring.com/documents/catalog/tools/5514.pdf>
- [79] 4855 HSS-Co5 Rullgängtapp Rak Metric TiN [online]. Skärande verktyg: Ecommerce software by PrestaShop, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://www.lack-olleab.se/gaengtappar/540-52297-4855-hss-co5-rullgangtapp-rak-metric-tin.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
A₁	Přední plocha vrchu tvářecího zubu
A₂	Přední plocha vrchu tvářecího zubu
A₃	Přední plocha vrchu tvářecího zubu
B₁	Střední plocha vrchu tvářecího zubu
B₂	Střední plocha vrchu tvářecího zubu
B₃	Střední plocha vrchu tvářecího zubu
C	Uhlík
C₁	Zadní plocha vrchu tvářecího zubu
C₂	Zadní plocha vrchu tvářecího zubu
C₃	Zadní plocha vrchu tvářecího zubu
CNC	Computer Numerical Control
CrN	Nitrid chromu
EP	Extreme Pressure – aditivace odolná vysokým tlakům
FeS₂	Disulfid železnatý, Pyrit
GO	Grafen oxide, oxidovaná forma grafenu
H₂O	Voda
HV	Tvrдость dle Vickerse
IF	Inorganic Fullerene, anorganický fulleren
IL	Ionic Liquid – iontové kapaliny
M	Kovová vrstva
M_{ch}	Maximální krouticí moment
M_{cx}	Hodnota maximálního poklesu krouticího momentu
M_d	Minimální krouticí moment
M_{dx}	Hodnota maximálního vzrůstu krouticího momentu
MoS₂	Sulfid Molybdeničitý (Molybdenit)
MS₂	Obecné označení sulfidů
N1	První testovaná nanoaditivní kapalina
N2	Druhá testovaná nanoaditivní kapalina
P	Polymerní kapalina

PP	Polypropylen
PVD	Physical Vapour Deposition
S	Síra
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
TiN	Nitrid titanu
WS₂	Sulfid wolframičitý
2D	Dvojměrný prostor
3D	Trojměrný prostor

Symbol	Jednotka	Popis
A_e	[J]	Energetická náročnost vytvoření jednoho závitu (podíl silové složky)
A_f	[J]	Energetická náročnost vytvoření jednoho závitu (podíl krouticího momentu)
A₅	[%]	Tažnost
D	[mm]	Průměr disku
F	[N]	Zatěžující síla
F_{fi}	[N]	Posuvová síla v i-tém čase
F_f	[N]	Třecí síla
F_t	[N]	Posuvová síla
M_c	[Nm]	Krouticí moment
M_{fi}	[Nm]	Krouticí moment v i-tém čase
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	Mez kluzu
T	[Nm]	Krouticí moment
Z	[%]	Kontrakce
d	[mm]	Průměr kuličky
f	[mm]	Posuv
n	[min ⁻¹]	Otáčky
r	[mm]	Vzdálenost osy rotace od stopy opotřebení
t	[s]	Čas

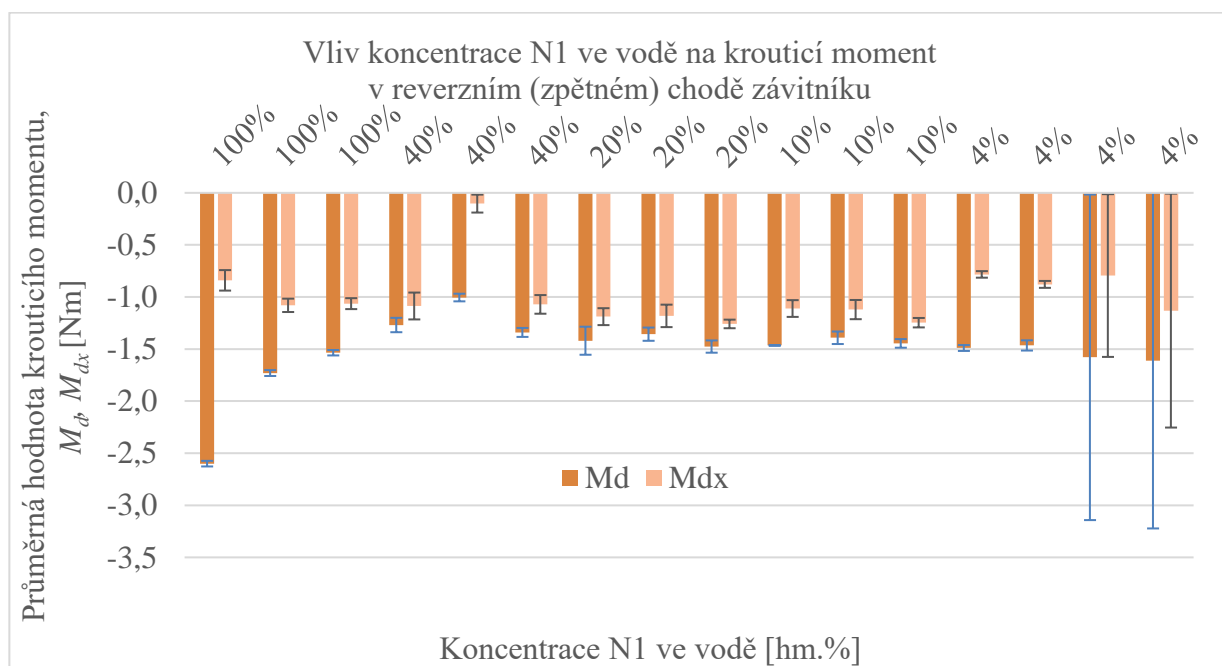
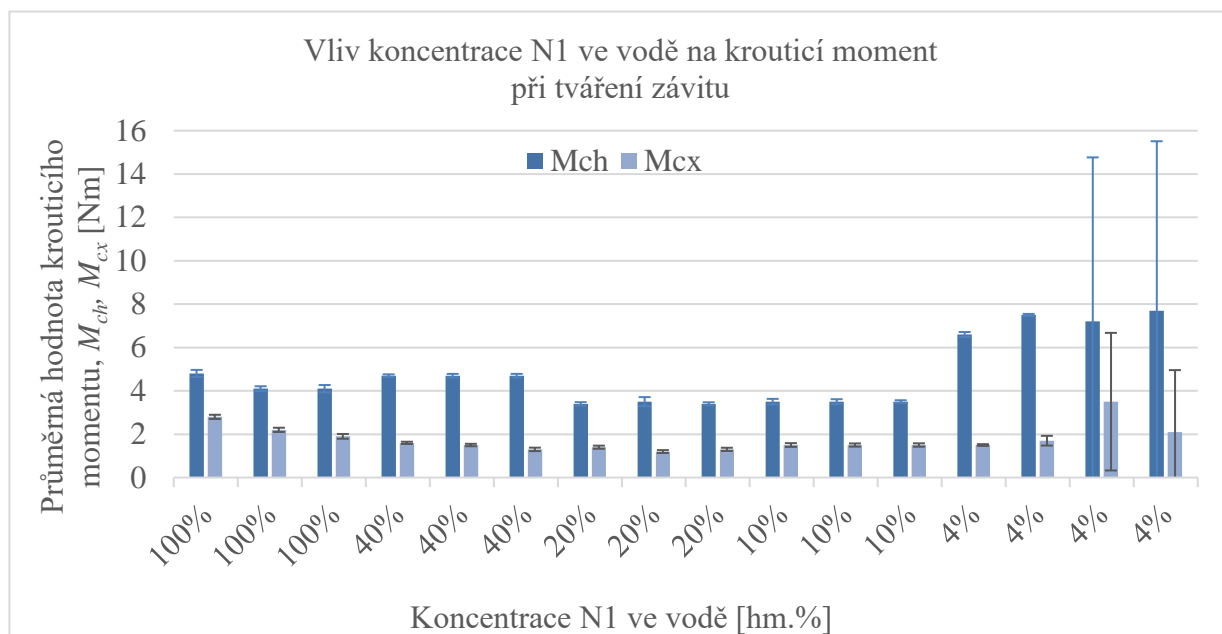
ΔA_{fi}	[J]	Přírůstek krouticího momentu
ΔP_{fi}	[J]	Přírůstek výkonu
Δv_{fi}	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
Δt_i	[s]	Časový přírůstek
ω	[rad.s ⁻¹]	Rychlost otáčení disku

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	...Vliv koncentrace N1 ve vodě na průběhy krouticích momentů
Příloha 2	...Vliv koncentrace N2 ve vodě na průběhy krouticích momentů
Příloha 3	...Vliv koncentrace P ve vodě na průběhy krouticích momentů
Příloha 4	...Poškození závitů z měření pro 4 % koncentraci N1 ve vodě
Příloha 5	...Poškození závitů z měření s kapalinou N2
Příloha 6.	...Poškození závitů z měření s kapalinou P
	...

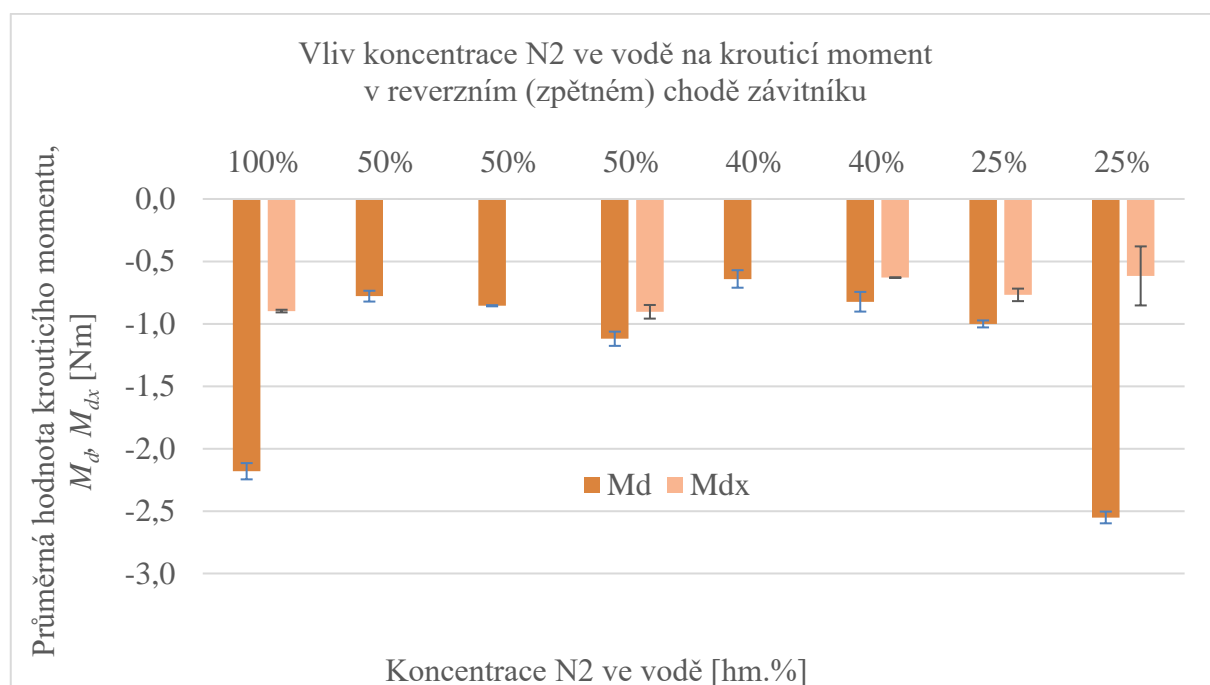
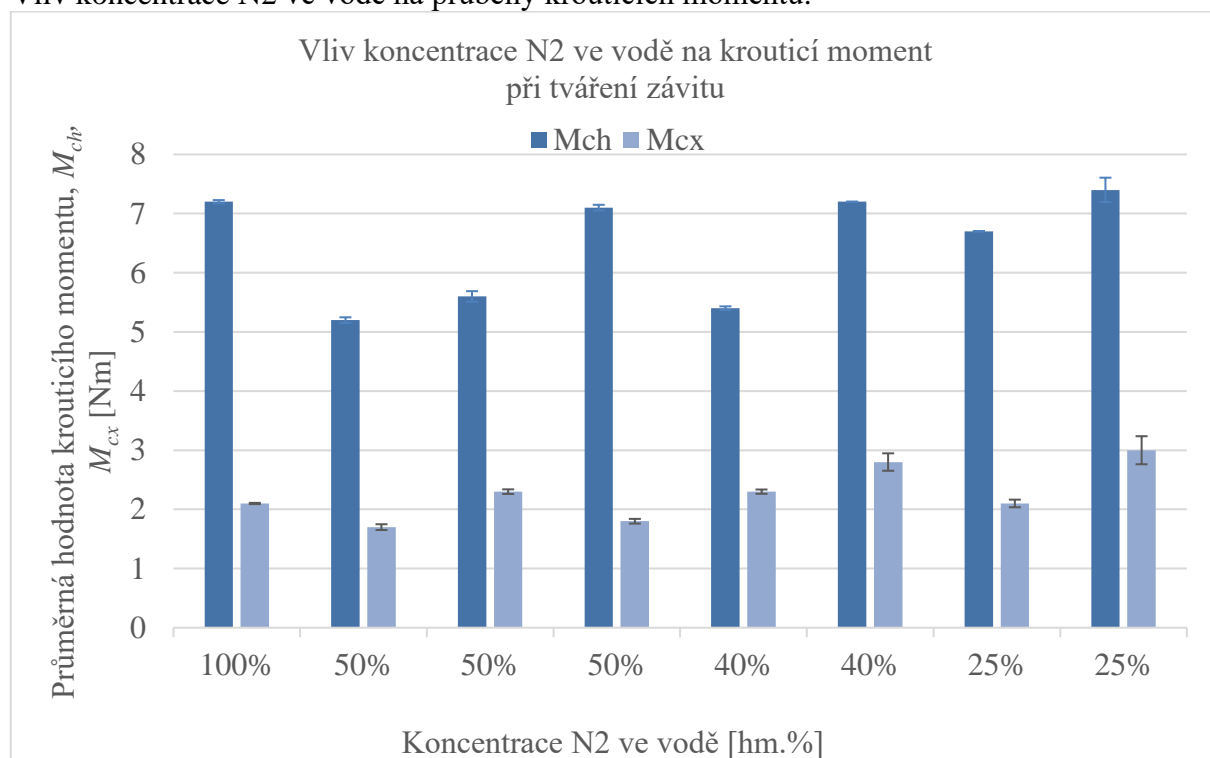
PŘÍLOHA 1

Vliv koncentrace N1 ve vodě na průběhy krouticích momentů.



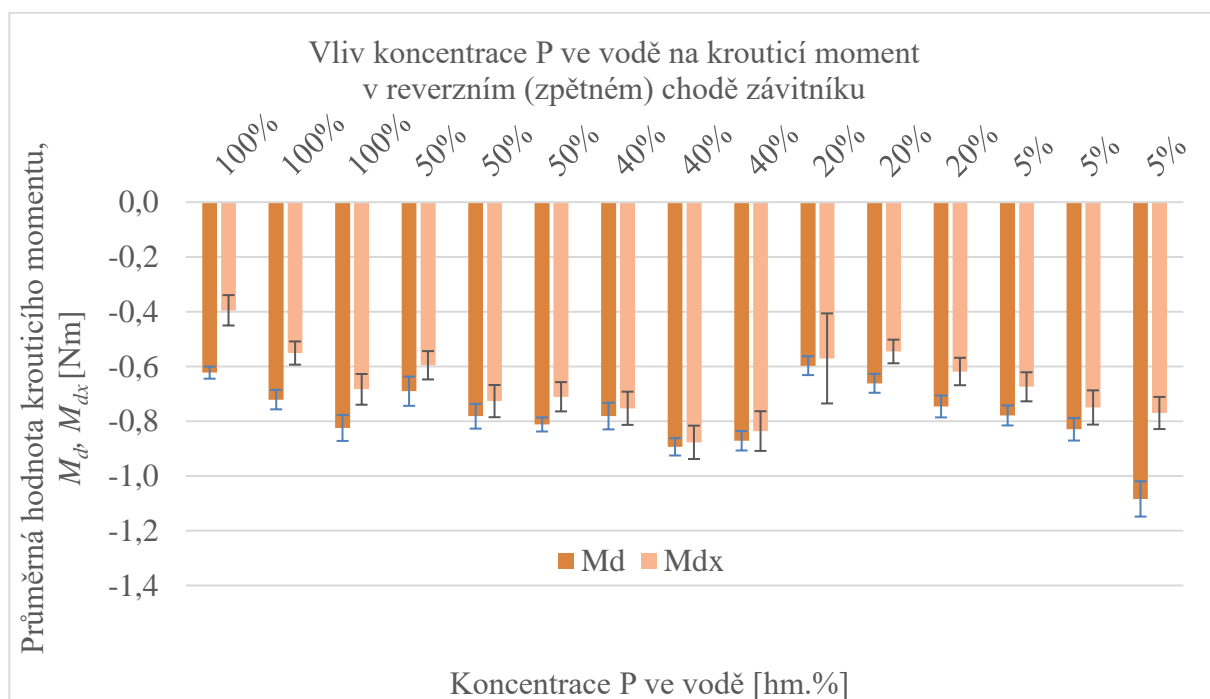
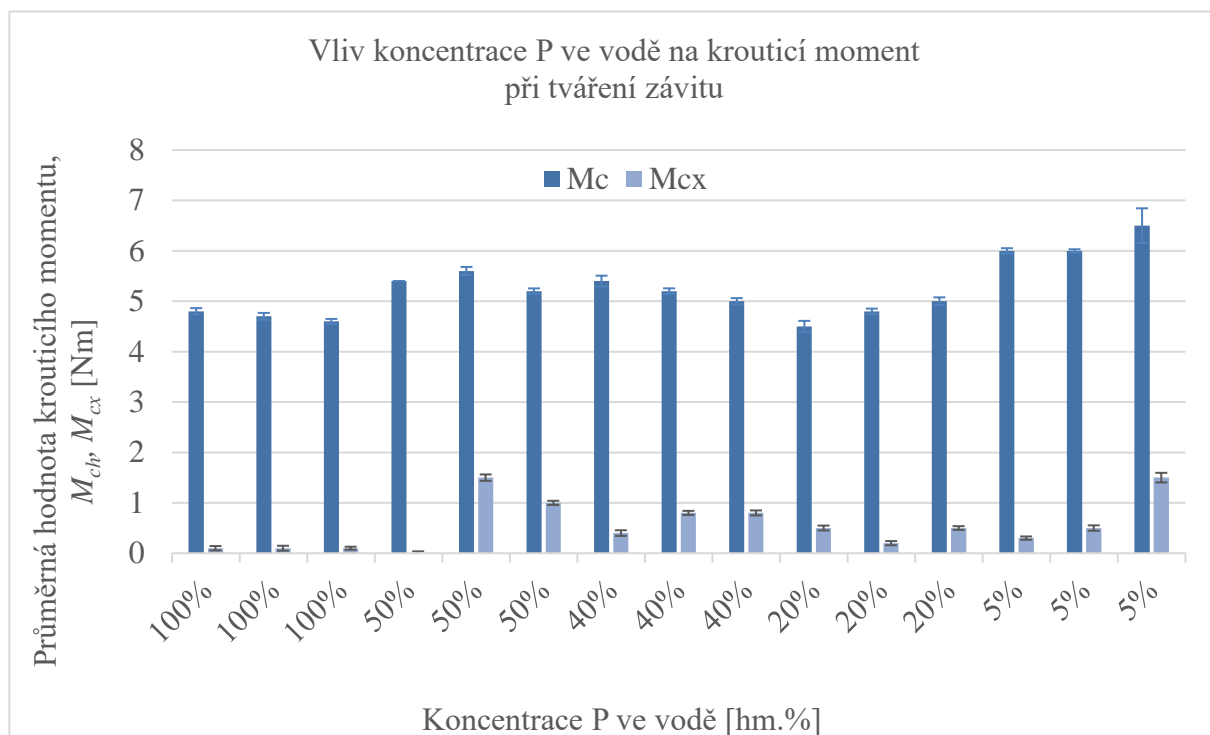
PŘÍLOHA 2

Vliv koncentrace N2 ve vodě na průběhy krouticích momentů.



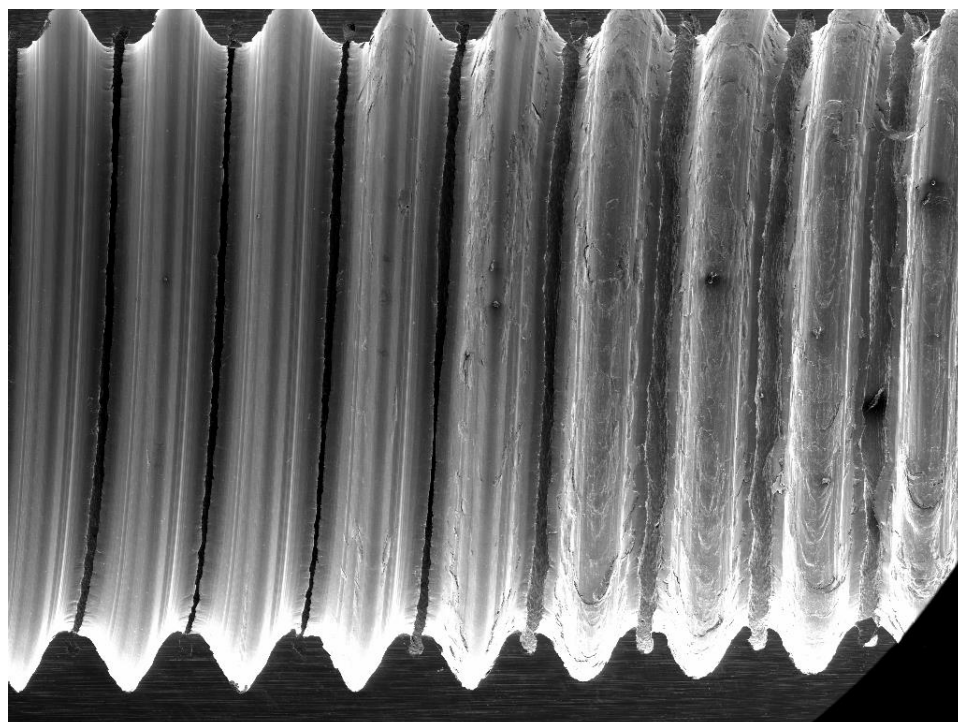
PŘÍLOHA 3

Vliv koncentrace P ve vodě na průběhy krouticích momentů.



PŘÍLOHA 4

Poškození závitů z měření pro 4 % koncentraci N1 ve vodě.

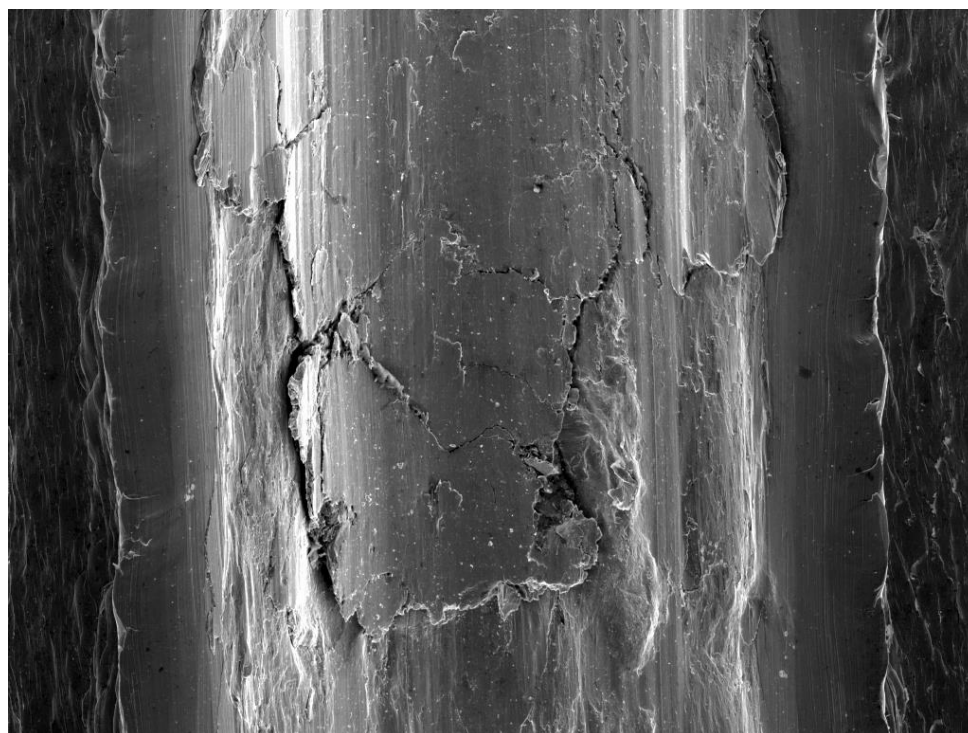


View field: 7.68 mm
WD: 36.0050 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: FIELD
SEM MAG: 25 x

2 mm

Vega ©Tescan

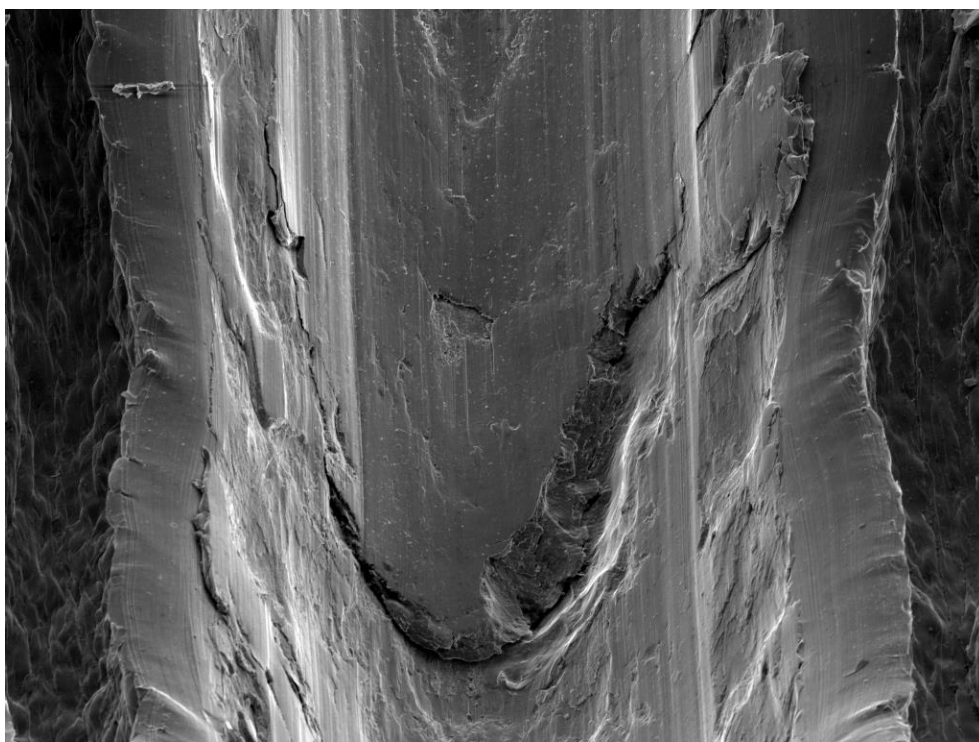


View field: 1.07 mm
WD: 41.4064 mm
HV: 20.0 kV

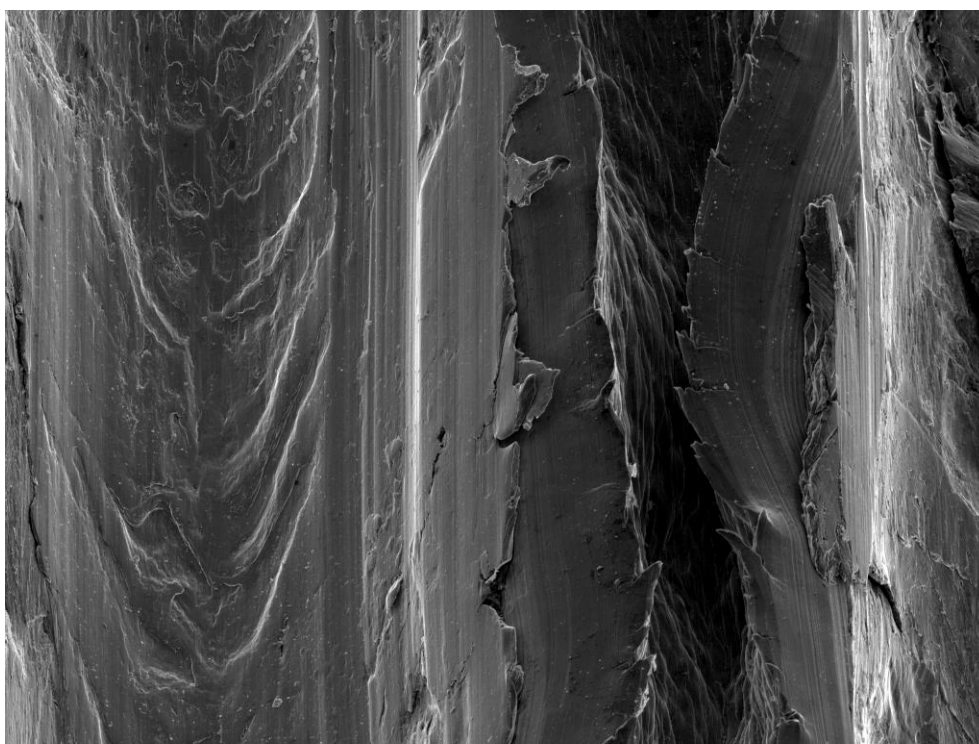
DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan



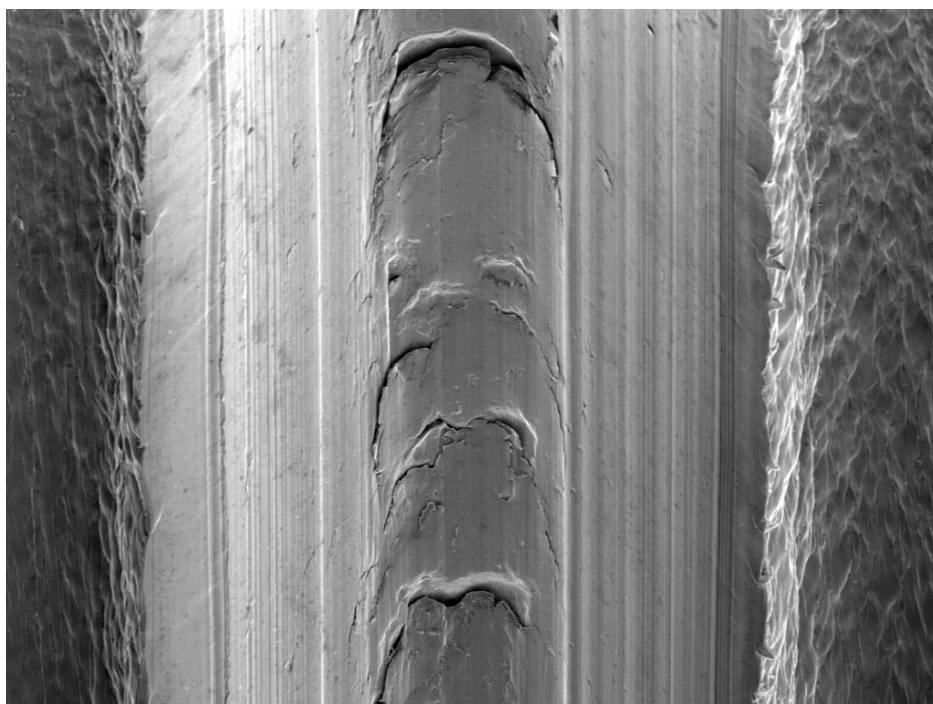
View field: 1.07 mm DET: SE Detector 500 um Vega ©Tescan
WD: 41.4064 mm SM: DEPTH
HV: 20.0 kV SEM MAG: 180 x



View field: 1.07 mm DET: SE Detector 500 um Vega ©Tescan
WD: 41.4064 mm SM: DEPTH
HV: 20.0 kV SEM MAG: 180 x

PŘÍLOHA 5

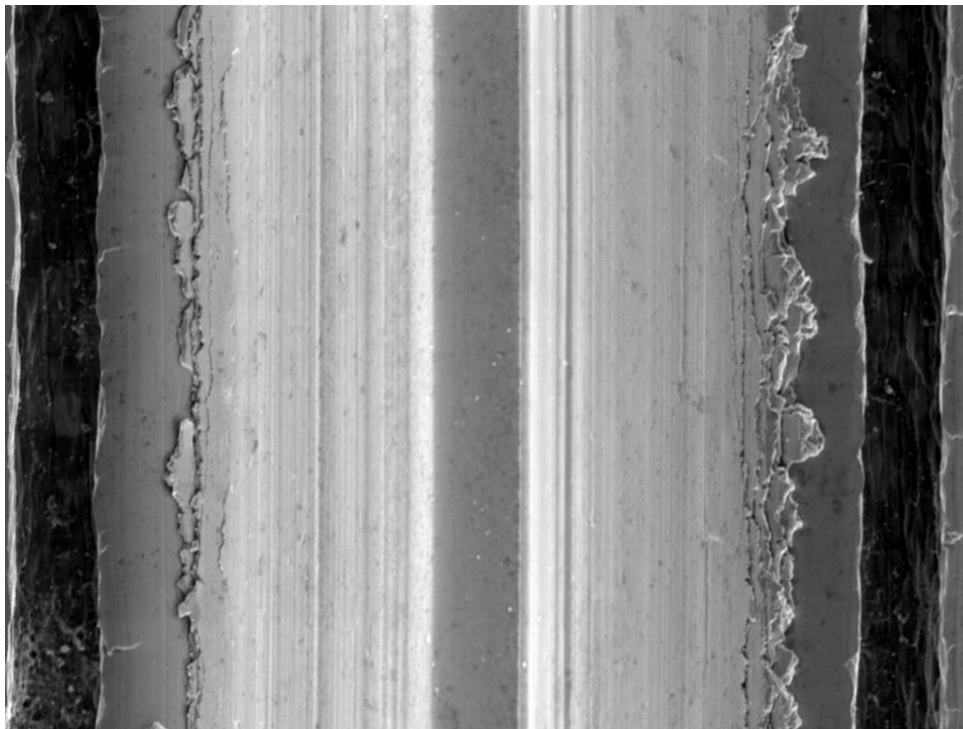
Poškození závitů z měření s kapalinou N2.



View field: 1.07 mm DET: SE Detector
WD: 43.3440 mm SM: DEPTH
HV: 20.0 kV SEM MAG: 180 x
500 um Vega ©Tescan



View field: 1.07 mm DET: SE Detector
WD: 37.7098 mm SM: DEPTH
HV: 20.0 kV SEM MAG: 180 x
500 um Vega ©Tescan

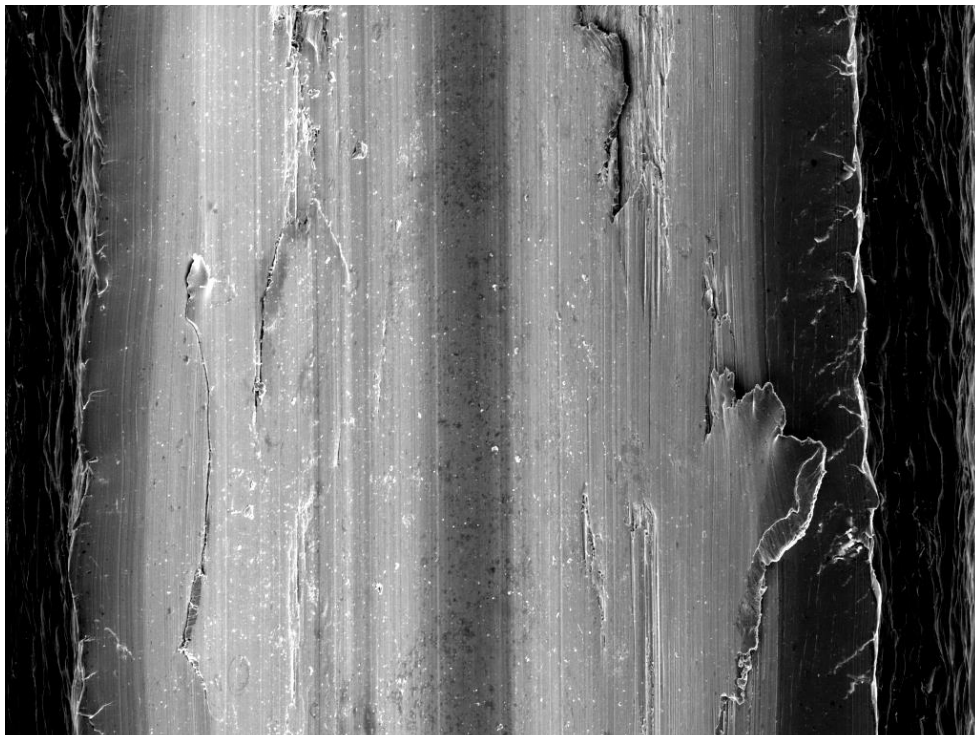


View field: 1.07 mm
WD: 41.1028 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan

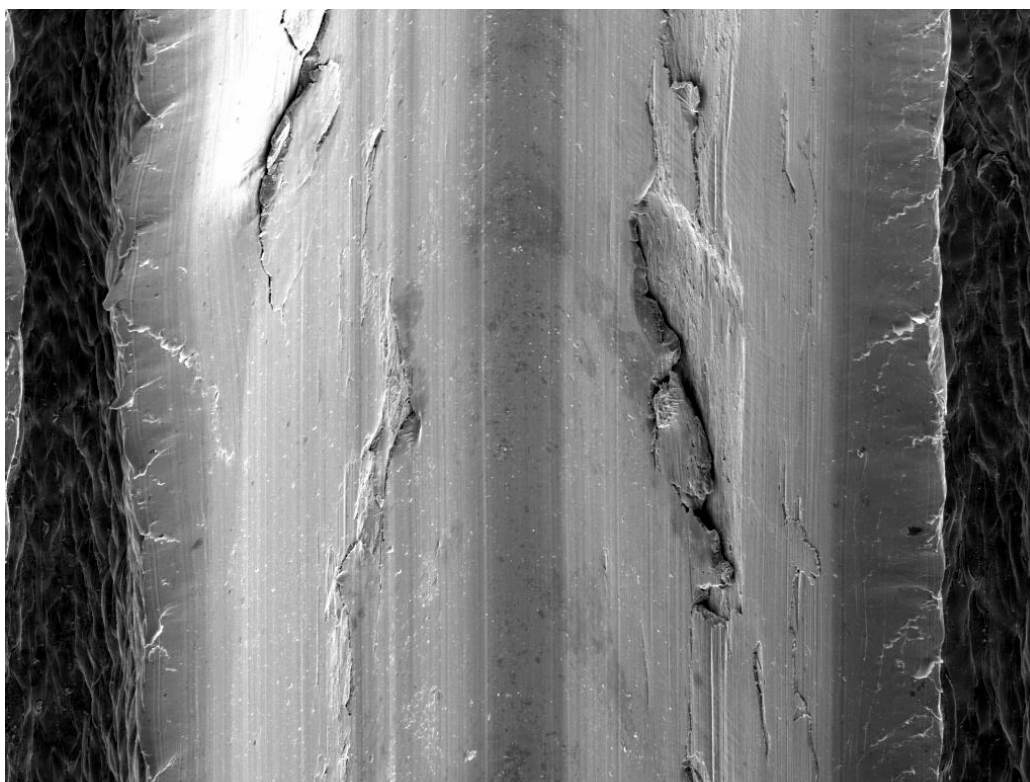


View field: 1.07 mm
WD: 42.6806 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

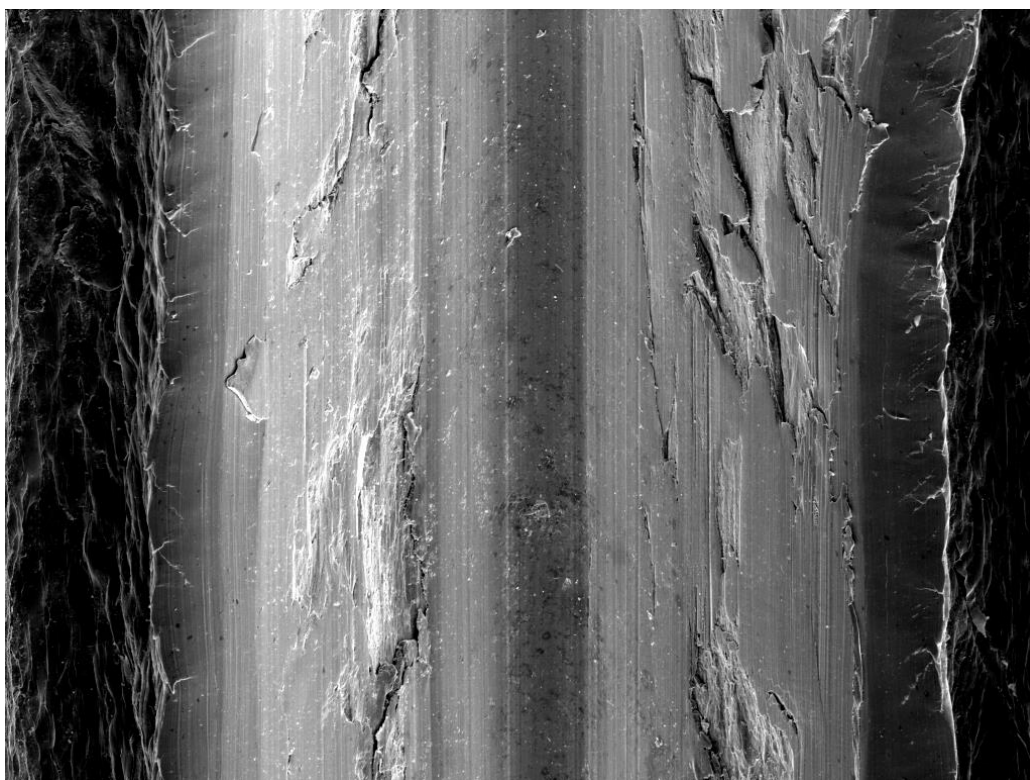
Vega ©Tescan



View field: 1.07 mm
WD: 42.6806 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

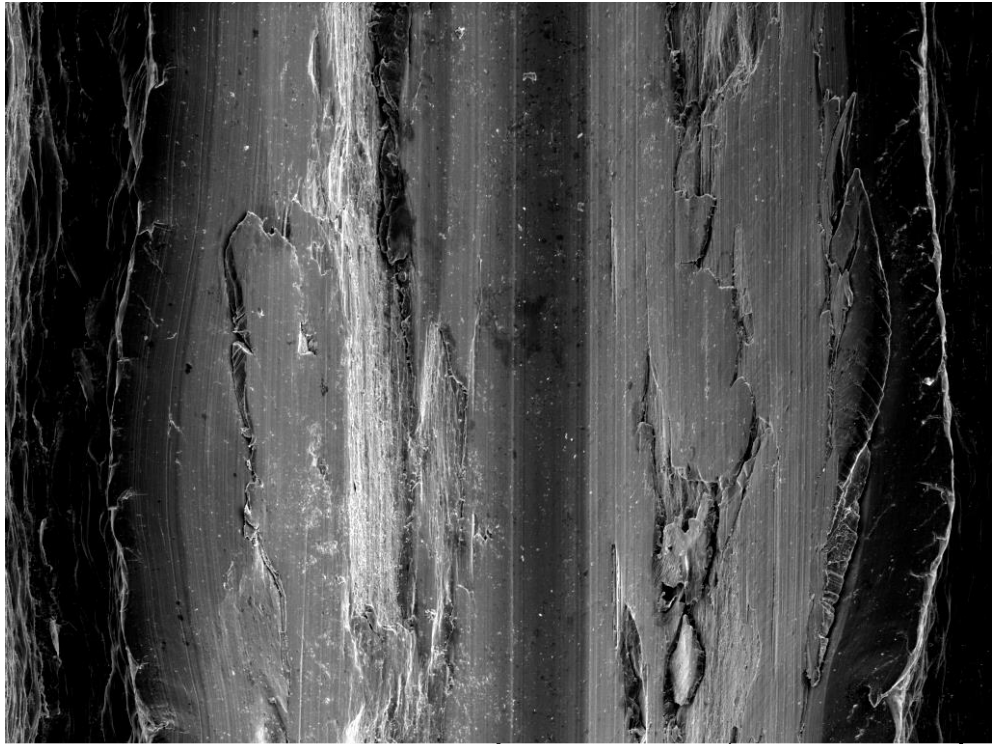
500 um Vega ©Tescan



View field: 1.07 mm
WD: 42.6806 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um Vega ©Tescan

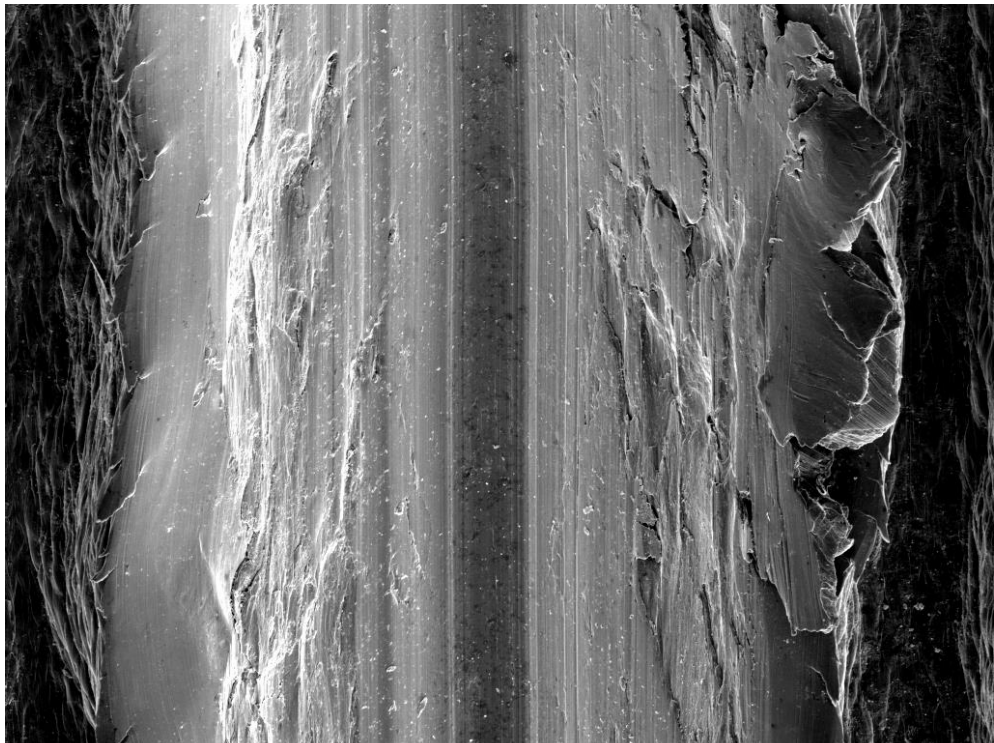


View field: 1.07 mm
WD: 42.6806 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan



View field: 1.07 mm
WD: 42.6806 mm
HV: 20.0 kV

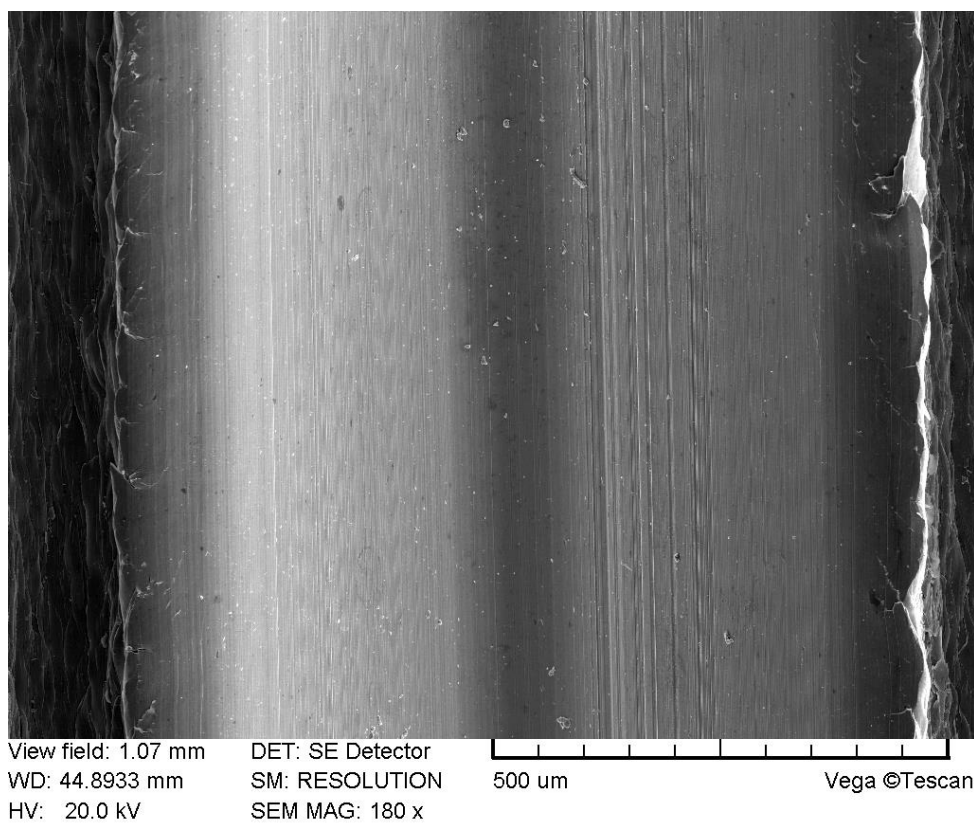
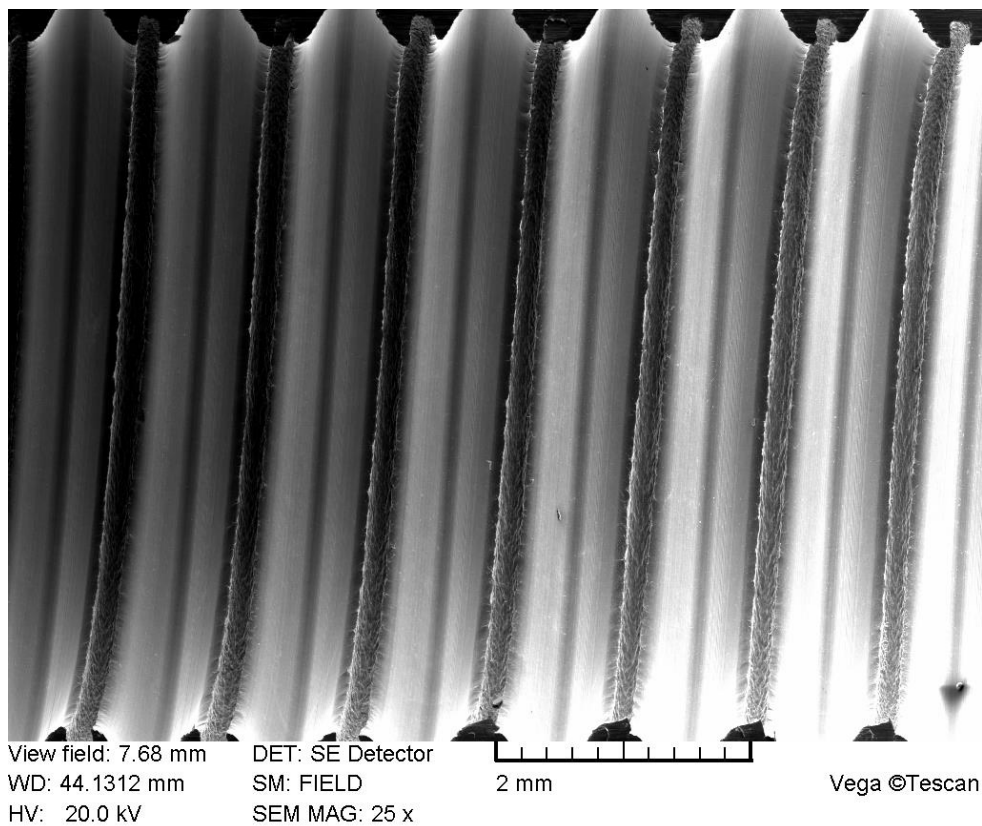
DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

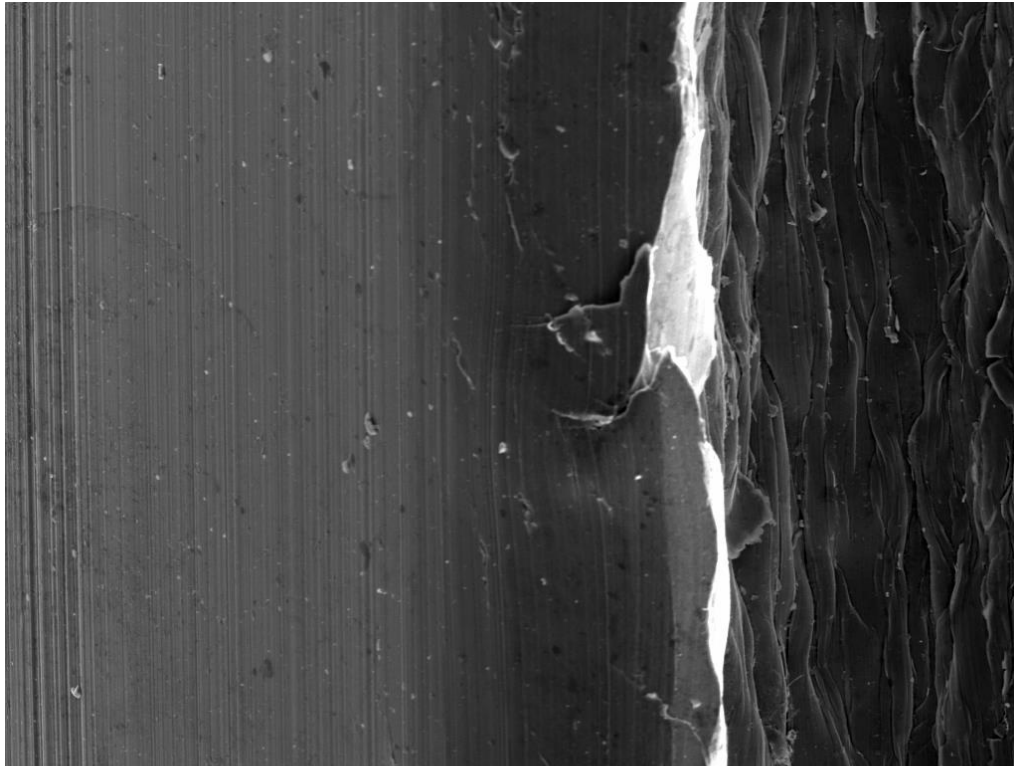
500 um

Vega ©Tescan

PŘÍLOHA 6

Poškození závitů z měření s kapalinou P.



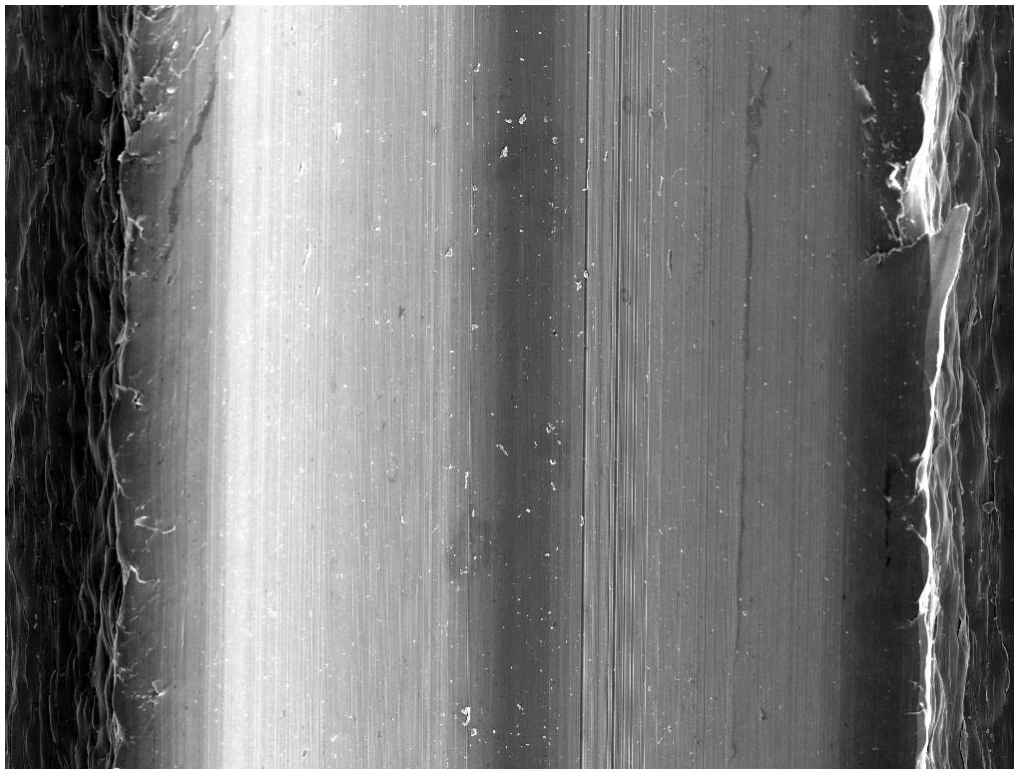


View field: 384.00 um
WD: 44.8933 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: RESOLUTION
SEM MAG: 500 x

100 um

Vega ©Tescan

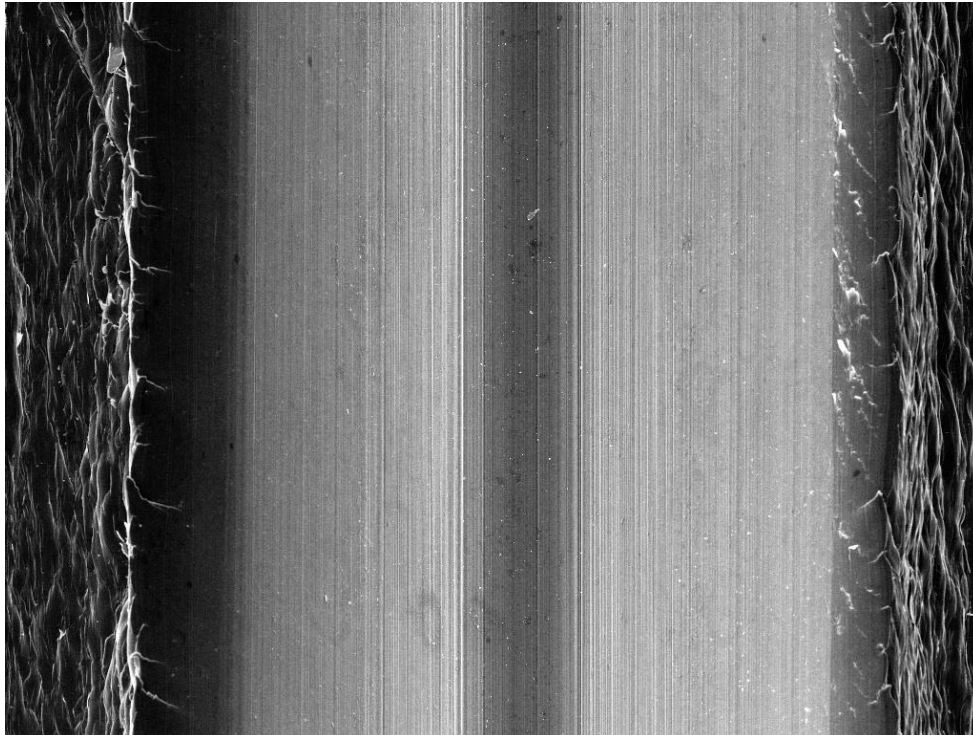


View field: 1.07 mm
WD: 43.2700 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: RESOLUTION
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan

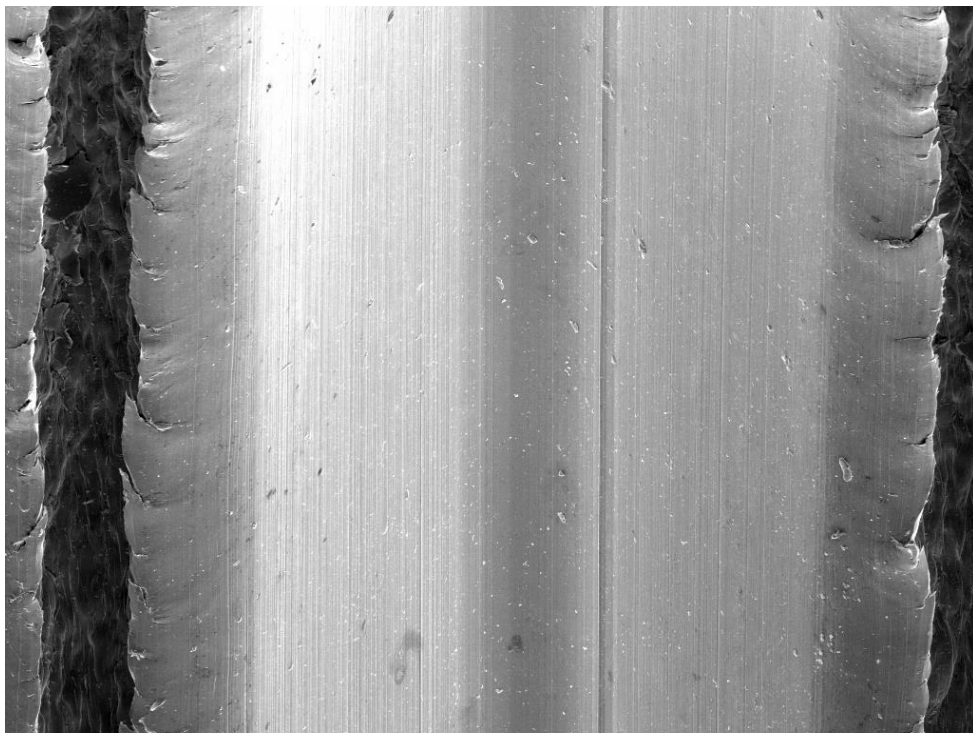


View field: 1.07 mm
WD: 44.7654 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: RESOLUTION
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan



View field: 1.07 mm
WD: 42.8126 mm
HV: 20.0 kV

DET: SE Detector
SM: DEPTH
SEM MAG: 180 x

500 um

Vega ©Tescan